

OULUN YLIOPISTO
UNIVERSITY of OULU

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**KYRÖNJOEN YLÄOSAN
TULVAPENGERRYSSALUEIDEN KÄYTÖN
OPTIMOINTI KESÄ- JA
SYYSTULVATILANTEISSA**

Jenni Lippo

Diplomityö
Ympäristötekniikan koulutusohjelma
Elokuu 2013

TIIVISTELMÄ

OPINNÄYTETYÖSTÄ

Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma (kandidaatintyö, diplomityö)		Pääaineopintojen ala (lisensiaatintyö)	
Ympäristötekniikan koulutusohjelma			
Tekijä		Työn ohjaaja yliopistolla	
Lippo, Jenni Maria		Kløve B., Professori	
Työn nimi			
Kyrönjoen yläosan tulvapengerrysalueiden käytön optimointi kesä- ja syystulvatilanteissa			
Opintosuunta	Työn laji	Aika	Sivumäärä
Vesi- ja geoympäristötekniikka	Diplomityö	Elokuu 2013	104 s., 14 s., 7 liitettä
Tiivistelmä			
<p>Tämän työn tarkoituksena on tutkia Kyrönjoen yläosan tulvapengerrysalueiden käytön optimointia kesä- ja syystulvatilanteissa siten, että tulvavahinkokustannukset jäisivät tulvavaara-alueella mahdollisimman pieniksi. Kesä- ja syystulvien aikana maanviljelyskäytössä olevilla tulvapengerrysalueilla voi syntyä satovahinkokustannuksia, mikäli alueille joudutaan johtamaan Kyrönjoesta vettä. Tutkimuksen tavoitteena on myös selvittää, voitaisiinko veden johtamista tulvapengerrysalueille viivästyttää nykyisestä käytännöstä ja mahdollisesti löytää uusi suositus vedenpinnankorkeudelle, jonka ylittyessä veden johtaminen tulvapengerrysalueille kannattaa aloittaa kesä- ja syystulvien aikana. Nykyään tulvapengerrysalueiden tulvaluukut tulee avata, kun vedenkorkeus ylittää Kyrönjoen Nikkolan sillan mitta-asteikolla arvon $N_{43} + 40,00$ m.</p> <p>Tutkimus alkaa Kyrönjoen pohjan kaikuluotauksella sekä joen virtausmallin ja tulvavaarakarttojen luomisella eri tulvatilanteille. Vesistöalueen kolmelle tärkeimmälle tulvapengerrysalueelle (Rintala, Tieksi ja Halkosaari) tehdään kustannusfunktiot, jotka kertovat satovahinkokustannusten muutoksesta vedenkorkeuden suhteen. Lisäksi tehdään rakennus- ja irtaimistovahinkojen muutoksesta vedenkorkeuden suhteen kertova kustannusfunktio tulvapengerrysalueiden ulkopuolisille asutusalueille. Lopullisissa kustannusfunktioissa asutusalueen vahinkokustannukset ja vedenkorkeus Nikkolan sillan kohdalla sidotaan joen tulvavirtaamaan ja pengerrysalueiden vedenkorkeus ja satovahinkokustannukset yhdistetään alueiden tulvaluukkujen keskimääräisiin virtaamiin tietyllä juoksutusaajalla. Näiden kustannusfunktioiden avulla saadaan aikaan epälineaarinen optimointiongelma, jolle asetetaan myös ongelmaa kuvaavat rajoiteyhtälöt.</p> <p>Optimointiongelma ratkaistaan erisuuruksilla joen tulvavirtaamilla ja ratkaisuksi saadaan suositukset joen tulvavirtaaman jakamisesta pengerrysalueiden tulvaluukkujen ja Kyrönjoen kesken. Laskelmissa tutkitaan myös pengerrysalueiden sadonkorjuuasteen vaikutusta laskentatuloksiin. Kustannusfunktiot luotiin epätarkkuuksien minimoimiseksi Matlab-ohjelmassa kuutiollisten splinien interpolaation suorittavalla spline-algoritmillä. Epälineaarisen optimointiongelman ratkaisemiseen käytettiin Matlabin fmincon-algoritmia, joka perustuu SQP-menetelmään (Sequential quadratic programming) eli toistetun kvadraattisen optimoinnin menetelmään.</p> <p>Työn tuloksena saatiin aikaan tutkimusmenetelmä, jolla voidaan tutkia optimaalista tapaa johtaa vettä Kyrönjoesta tulvapengerrysalueille erilaisissa kesä- ja syystulvatilanteissa. Tutkimusmenetelmää käytettäessä voidaan huomioida pengerrysalueiden sadonkorjuuaste, joka saattaa vähentää pengerrysalueilla syntyviä kustannuksia. Menetelmän heikkoutena on se, että tutkimusta suoritettaessa pengerrysalueiden tulvaluukkujen käyttöaika on arvioitava etukäteen. Tämän työn esimerkkilaskelmassa tulvaluukkujen käyttöajaksi arvioitiin kaksi vuorokautta. Toisin sanoen tulvaluukkujen erisuuruksilla keskimääräisillä virtaamilla syntyvät satovahinkokustannukset perustuivat kahden vuorokauden mittaisiin tulvajuoksutuksiin. Tutkimusmenetelmän avulla voidaan myös tarkastella yleisesti erilaisissa tulvatilanteissa syntyviä kustannuksia.</p>			
Muita tietoja			

ABSTRACT FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

Degree Programme (Bachelor's Thesis, Master's Thesis)		Major Subject (Licentiate Thesis)	
Degree programme in Environmental engineering			
Author		Thesis Supervisor	
Lippo, Jenni Maria		Kløve B., Prof.	
Title of Thesis			
Optimization of the use of river Kyrönjoki flood plain areas during summer and autumn floods			
Major Subject	Type of Thesis	Submission Date	Number of Pages
Water and Geoenvironmental engineering	Master's Thesis	August 2013	104 p., 14 p., 7 app.
Abstract <p>Purpose of this thesis is to examine the optimization of the use of river Kyrönjoki flood plain areas during summer and autumn floods to minimize the flood damage costs on the flood area. During summer and autumn floods the conveyance of the water from river Kyrönjoki to the flood plain areas surrounded by banks may cause some crop damage costs, because the flood plains are in agricultural use. Another objective of this study is to find out, if it is profitable to delay the conveyance of water to the flood plain areas compared to the current practice, and possibly to find a new maximum limit for water height in river Kyrönjoki after which the water should be conveyed to the flood plain areas. Nowadays the flood gates of the flood plain areas must be opened, when the water height of river Kyrönjoki at the measurement point of bridge Nikkola exceeds value $N_{43} + 40,00$ m.</p> <p>The study begins with the echo-sounding of the Kyrönjoki river bed and with the creation of flow model and flood maps for different flood situations. Cost functions between crop damage costs and water height are made for the three most important flood plain areas, Rintala, Tieksi and Halkosaari. Also cost function between the buildings and movables damage costs and the river water height at the bridge Nikkola is made. In the final cost functions the damage costs of the residential areas and the water height at the bridge Nikkola is bound with the river flood discharge in the same place. Also the water heights and the crop damage costs in the flood plain areas are bound to the average discharges of the flood gates during the certain opening time of the gates. A problem of nonlinear programming is constructed with the help of the cost functions and the constraints describing the problem.</p> <p>The created nonlinear programming problem is solved by setting different values for the river flood discharge. Recommendations for the division of the river flood discharge between the flood gates and the river are achieved as a solution for each of the flood situations. Also the impact of the harvest degree to the calculation results is examined. The cost functions were created in Matlab using the spline-algorithm, with cubic interpolation, to minimize the error. Solutions to the nonlinear programming problems were calculated in Matlab using the fmincon-algorithm, which is based on sequential quadratic programming.</p> <p>As a result of this thesis a research method was achieved. The method can be used to study the optimal practice to convey water from the river Kyrönjoki to the flood plain areas during different kind of summer and autumn flood scenarios. A weakness of the method is that the opening time of the flood gates must be assessed beforehand. In the example calculation of this thesis, the opening time of the flood gates was determined to be two days. This means that the crop damage costs caused by different average discharges of the flood gates were based on a two days lasting conveyance of water to the flood plains. The damage costs of different flood situations can also be generally studied with the created research method.</p>			
Additional Information			

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Etelä-Pohjanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskuksen Vesistöyksikölle. Kiitän lämpimästi mielenkiintoisesta diplomityöaiheesta, työn ohjauksesta ja kullannarvoisista neuvoista Sari Yli-Mannilaa, Liisa Maria Rautiota ja Suvi Saarniaho-Uittoa. Kiitos kuuluu myös kaikille muille minua työssäni avustaneille ja opastaneille Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksen työntekijöille, kuten Jenni Mäkelälle, Juhani Huhtamäelle, Kari Kalliolle ja Katja Haukilehdolle. Lisäksi kiitos työssäni avustaneille Suomen ympäristökeskuksen työntekijöille, erityisesti Mikko Sanelle ja Antti Parjanteelle. Tutkimusmenetelmiini liittyvillä neuvoillanne oli työn kannalta suuri merkitys.

Erityisesti haluan kiittää myös Ympäristötekniikan insinööritoimisto Jami Ahoa Kyrönjoen kaikuluotauksen mahdollistamisesta ja muusta tutkimuksen pohjamateriaalin luomisesta.

Professori Bjørn Kløvelle suuri kiitos työn valvomisesta ja neuvoista työn sisällön ja rakenteen osalta. Kiitos Maa- ja vesitekniikan tuki ry:lle työn osittaisesta rahoittamisesta.

Lopuksi lämmin kiitos koko opiskeluaikaisesta kannustuksesta ja tuesta perheelleni, ystäville ja Joonalle.

Oulussa, 30.8.2013

Jenni Lippo

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	2
ABSTRACT	3
ALKUSANAT	4
SISÄLLYSLUETTELO.....	5
MERKINNÄT JA LYHENTEET.....	7
1 JOHDANTO	8
2 KYRÖNJOEN VESISTÖALUE	11
2.1 Kyrönjoki.....	12
2.1.1 Kyrönjoen virtaamista ja vedenkorkeuksista	14
2.1.2 Kyrönjoen tulvaherkkyydestä	15
2.2 Järvet, tekojärvet, ja voimalaitokset.....	15
3 TULVAT, TULVARISKIT JA TULVAVAHINGOT	17
3.1 Tulvariskien kartoittaminen ja tulvavaarakartat	18
3.2 Tulvariskien hallinta.....	20
3.2.1 Direktiivi tulvariskien arvioinnista ja hallinnasta	20
3.2.2 Laki ja valtioneuvoston asetus tulvariskien hallinnasta	21
3.3 Tulvavahinkojen korvauskäytännöt	22
4 KYRÖNJOEN TULVAT JA TULVASUOJELU	24
4.1 Tulvaongelmat Kyrönjoen yläosalla	24
4.1.1 Tulvien vaikutus satoihin.....	25
4.1.2 Jääpatotulvat ja suppotulvat.....	26
4.2 Ilmajoen tulvariskikartoitus	26
4.3 Kyrönjoen tulvantorjunnan nykytilanne	32
4.4 Tulvasuojelurakenteet	32
4.4.1 Tulvapengerrysalueet.....	33
4.4.2 Tekojärvet	36
4.4.3 Tilapäiset tulvasuojelurakenteet.....	37
4.4.4 Alimmat rakentamiskorkeudet	37
4.5 Toimenpiteet tulvatilanteissa	39
4.6 Joen tulvarajan määrittely.....	40
5 ILMASTONMUUTOKSEN VAIKUTUS TULVIIN	43
5.1 Kyrönjoen vesistöalueen sadantatiedot	45

5.2 Ilmastomuutoksen vaikutus Kyrönjoen tulvanhallintaan	47
6 SYKSYN 2012 TULVA KYRÖNJOELLA.....	49
6.1 Syystulvan 2012 vahingot	52
7 PENGERRYSSALUEIDEN KÄYTÖN OPTIMOINTI.....	55
7.1 Ongelman käsitteellinen malli ja käsittelytapa	55
7.2 Tulvaluukkujen virtaamat.....	58
7.3 Kyrönjoen yläosan kaikuluotaus ja virtausmallinnus.....	61
7.3.1 Kyrönjoen kaikuluotaus.....	62
7.3.2 Virtausmallinnus HEC-RAS 4.0 -ohjelmalla.....	62
7.4 Tavoitefunktio.....	65
7.4.1 Pengerryssalueiden tulvavahinkofunktiot	65
7.4.2 Asutusalueiden tulvavahinkofunktio	68
7.5 Rajoiteyhtälöt.....	76
7.6 Optimointiongelman ratkaiseminen	80
7.6.1 Optimointimenetelmä	81
7.6.2 Laskennan tulokset	82
8 TULOSTEN ARVIOINTI.....	88
8.1 Virhelähteet.....	90
8.2 Mahdollisuudet nykyisten käytäntöjen muuttamiseen	93
9 YHTEENVETO.....	96
LÄHDELUETTELO.....	98
LIITTEET.....	105

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1/20	tilastollisesti kerran 20 vuodessa toistuva
b	patoluukun leveys
DEM	Digital Elevation Model eli Digitaalinen maastomalli
ELY-keskus	Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus
GNSS/GPS	Global Navigation Satellite System / Global Positioning System
$h_1, 2, 3, 4$	vedenkorkeudet pengerrysalueilla ja joessa (m)
h_a	patoluukun avauskorkeus (m)
h_{ala}	alaveden korkeus (m)
h_{kr}	kriittinen vedenkorkeus
$h_{ylä}$	yläveden korkeus (m)
HQ	ylivirtaama (m^3/s)
HW	ylivedenpinnankorkeus (m)
MQ	keskivirtaama (m^3/s)
N_{43} , N_{60} ja N_{2000}	korkeusjärjestelmiä
NQ	alivirtaama (m^3/s)
Q	virtaama (m^3/s)
Q_{arv}	arvioitu virtaama (m^3/s)
RHR	Rakennus- ja huoneistorekisteri
t	aika (s)
V	tilavuus (m^3)
~	noin, pyöristetty lukuarvo
μ	purkautumiskerroin
§	pykälämerkki

1 JOHDANTO

Etelä-Pohjanmaalla sijaitseva Kyrönjoen vesistöalue on ollut tulva-altista seutua jo satojen vuosien ajan. Vanhimmat merkinnät alueen tulvaongelmista ovat peräisin 1700-luvulta. (Syvänen & Leiviskä 2007: 7) Pieniä tulvasuojeluun tähtääviä vesistöitä on Etelä-Pohjanmaalla tehty 1600-luvun lopusta lähtien ja pienimuotoisia Kyrönjoen perkauksia 1700-luvulta lähtien (Turunen 1985: 32, 73). Alueen vesistötyöt olivat aluksi lähinnä lisämaan hankkimiseen tähtääviä järvenlaskuja sekä jokien ja koskien perkauksia, joiden tarkoituksena oli tulvasuojelun lisäksi vene- ja kuljetusväylien parantaminen. Viljelysmaan lisätarve johti soiden ojitukseen ja kuivattamiseen, joita valtio alkoi tukea voimakkaasti 1850-luvulla. (Turunen 1985: 70) Vesiperäisten maiden kuivattaminen toi Etelä-Pohjanmaalle lisää viljelysmaata, mutta pahensi osaltaan alavan maakunnan tulvaongelmaa. Kun jokien yläjuoksilla ei ollut enää riittävästi soita, kosteikkoja ja järviä pidättämässä vettä, virtasivat pintavedet tavallista nopeammin ojitusten kautta jokiin ja aiheuttivat jokien tulvimisen etenkin lumien sulaessa keväällä.

Kyrönjoen vesistöiden pitkän ja monivaiheisen historian aikana tulvia edistävät kuivatus- ja ojitustyöt ovat kilpailleet tulvasuojelua edistävien toimien kanssa. Uudempia tulvasuojelutoimia alueella edustavat tulvapengerrysalueiden ja tekojärvien rakentamiset. Suuret tulvasuojelutyöt aloitettiin Kyrönjoella 1950-luvulla. Seinäjoella perustettiin 10.8.1953 Kyrönjoki-toimikunta ajamaan joen tulvasuojelua ja jo vuonna 1965 valmistui Pohjanmaan jokisuunnittelutoimistossa tekojärvet, penkereet ja voimalat sisältävä Kyrönjoen vesistöaloussuunnitelma. (Orrenmaa 2004: 108)

Nykyään Kyrönjoen vesistöalueen tulvahaittoja voidaan vähentää päästämällä tulva-aikoina vettä tekojärviin. Tekojärvien varastotilavuuden avulla on jokeen voitu varmistaa myös normaalia suurempi alivirtaama. Pengerrysalueille, eli tulvapenkereiden suojaamille pelloille, aletaan johtaa vettä vasta, kun Kyrönjoen vedenkorkeus Ilmajoella sijaitsevan Nikkolan sillan mitta-asteikolla ylittää arvon $N_{43} + 40,00$ m. (Syvänen & Leiviskä 2007: 7) Taulukossa 1 on esitetty Kyrönjoen tulvasuojeluun liittyvät rakennusprojektit vuosina 1966–2004.

Taulukko 1. Kyrönjoen tulvasuojelutöitä 1966–2004 (Orrenmaa 2004: 108).

Vuosi	Rakennustyö
1966	Liikapuron tekojärvi valmistuu Seinäjoen latvavesille
1968	Seinäjoen suuosan oikaisu-uoman rakentaminen
1968	Pitkämön tekojärvi valmistuu Kurikassa
1970	Kalajärven tekojärvi valmistuu Peräseinäjoella
1977	Kyrkösjärven tekojärvi rakentaminen alkaa
1980	Kyrönjoen yläosan pengerrystyöt alkavat
2003	Malkakosken tekokoski valmistuu
2004	Kyrönjoen yläosan tulvasuojelutyö valmistuu

Kesä- ja syystulvien aikana pelloilla voi olla vielä korjaamattomia satoja, joiden jääminen tulvaveden alle aiheuttaa tappioita maanviljelijöille. Mikäli vedenkorkeus ylittää syksyllä Nikkolan sillan kohdalla arvon $N_{43} + 40,00$ m, olisikin ensin arvioitava pengerrysalueiden käytön hyödyt ja haitat. Jos vettä ei tällaisessa tilanteessa johdeta pengerrysalueille, vedenpinnan taso Kyrönjoessa voi nousta haitallisen korkealle pengerrysalueiden yläpuolella Ilmajoen keskustaajaman alueella tai pengerrysalueiden alapuolella Kyrönjoen alajuoksulla.

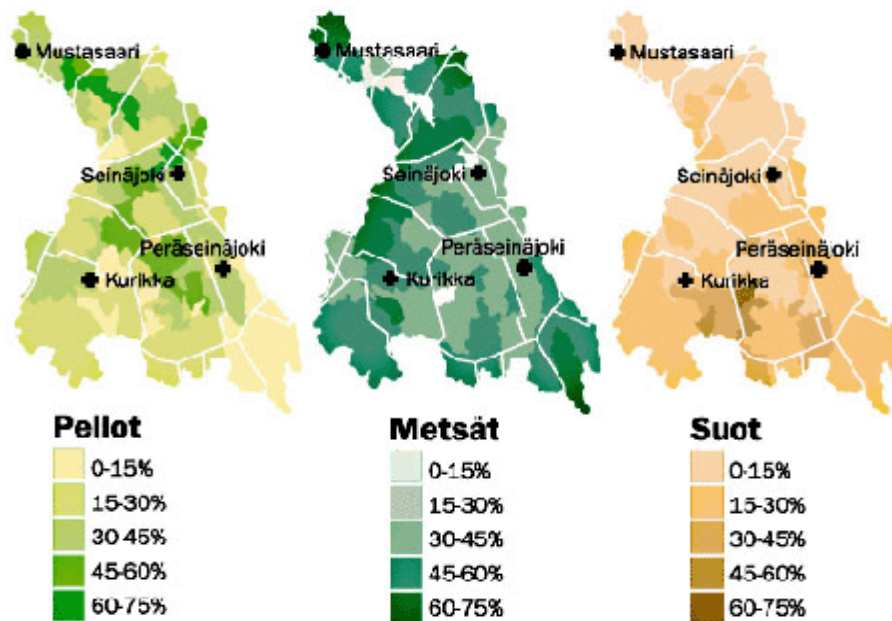
Ilmastonmuutos voi johtaa kevättulvien pienentymiseen ja suurten kesä- ja syystulvien lisääntymiseen Suomessa (Veijalainen ja Vehviläinen 2008: 9–10). Ilmastonmuutos luo siis uusia paineita Kyrönjoen vesistöalueen tulvasuojelun kehittämiseksi. Ongelmaa ei ole kuitenkaan välttämättä järkevintä ratkaista rakentamalla alueelle uusia kalliita tulvasuojelurakenteita kuten tekojärviä. Ilmajoen tulvariskien hallinnan yleissuunnitelmassa todetaan, että pengerrysalueiden käytön tehostaminen tulvatilanteessa on todennäköisesti yksi niistä toimenpiteistä, joilla voidaan tulevaisuudessa saavuttaa suurimmat hyödyt Ilmajoen alueen tulvasuojelussa (Suomen Salaojakeskus Oy 2010).

Tämän tutkimuksen tavoitteena on tutkia Kyrönjoen yläosan tulvapengerrysalueiden käytön optimointia kesä- ja syystulvatilanteissa siten, että tulvavahinkokustannukset sekä tulvapengerrysalueilla että asuinalueilla jäävät mahdollisimman pieniksi. Tarkastelemalla Kyrönjoen rantojen asutusalueilla sekä pengerrysalueilla syntyvien tulvavahinkojen kustannuksia eri vedenkorkeuksilla saadaan aikaan kustannusfunktiot,

joiden avulla veden johtamista joesta pengerrysalueille voidaan optimoida kustannusten minimoinnin kautta. Näin voidaan tutkia, olisiko joissakin tulvatilanteissa järkevää viivästyttää veden johtamista pengerrysalueille vedenkorkeuden $N_{43} + 40,00$ m ylityttyä Nikkolan sillan mitta-asteikolla. Toisaalta vedenkorkeuden nousu Kyrönjoessa tulva-aikana nykyisten luparajojen yli saattaa aiheuttaa ongelmia pengerrakenteissa. Nykyisen pengerrysalueiden käyttötavan muuttaminen voi jopa vaatia penkereiden korottamista.

2 KYRÖNJOEN VESISTÖALUE

Kyrönjoen vesistöalueen pinta-ala on 4922,97 km². Alueen järvisyys on vain 1,23 %, mikä osaltaan vaikuttaa Kyrönjoen suuriin virtaamavaihteluihin ja lisää alueen tulvaherkkyyttä. (Ekholm 1993: 76) Kyrönjoen valuma-alueesta lähes kolmasosa (29 %) on peltoa, viidesosa (20 %) suota ja kaksi viidesosaa (38 %) metsiä (Länsi-Suomen ympäristökeskus 2000a). Maankäytön jakaantuminen valuma-alueella on esitetty kuvassa 1. Peltojen osuus Kyrönjoen vesistöalueesta on suuri verrattuna Suomen muihin jokilaaksoihin. Metsät ja suot ovat keskittyneet valuma-alueen latvoille, kun taas jokilaaksoissa suuri osa maa-alasta on peltojen ja taajamien valtaamaa. Suurin osa valuma-alueen soista on ojitettu. Myös metsät ovat laajalti ojitettuja. (Syvänen ja Leiviskä 2007: 8) Turvepohjaisilla pelloilla tapahtuu maanpainumista, joka lisää alueen tulvaherkkyyttä. Esimerkiksi Kyrönjoen Alajoella Tieksin pengerrysalueella (Kuva 7) pellot on muodostettu kydöttämällä eli ojittamalla suomaata, josta kuivunut turvekerros on sitten poltettu. (Teppo ym. 2006: 9–14)

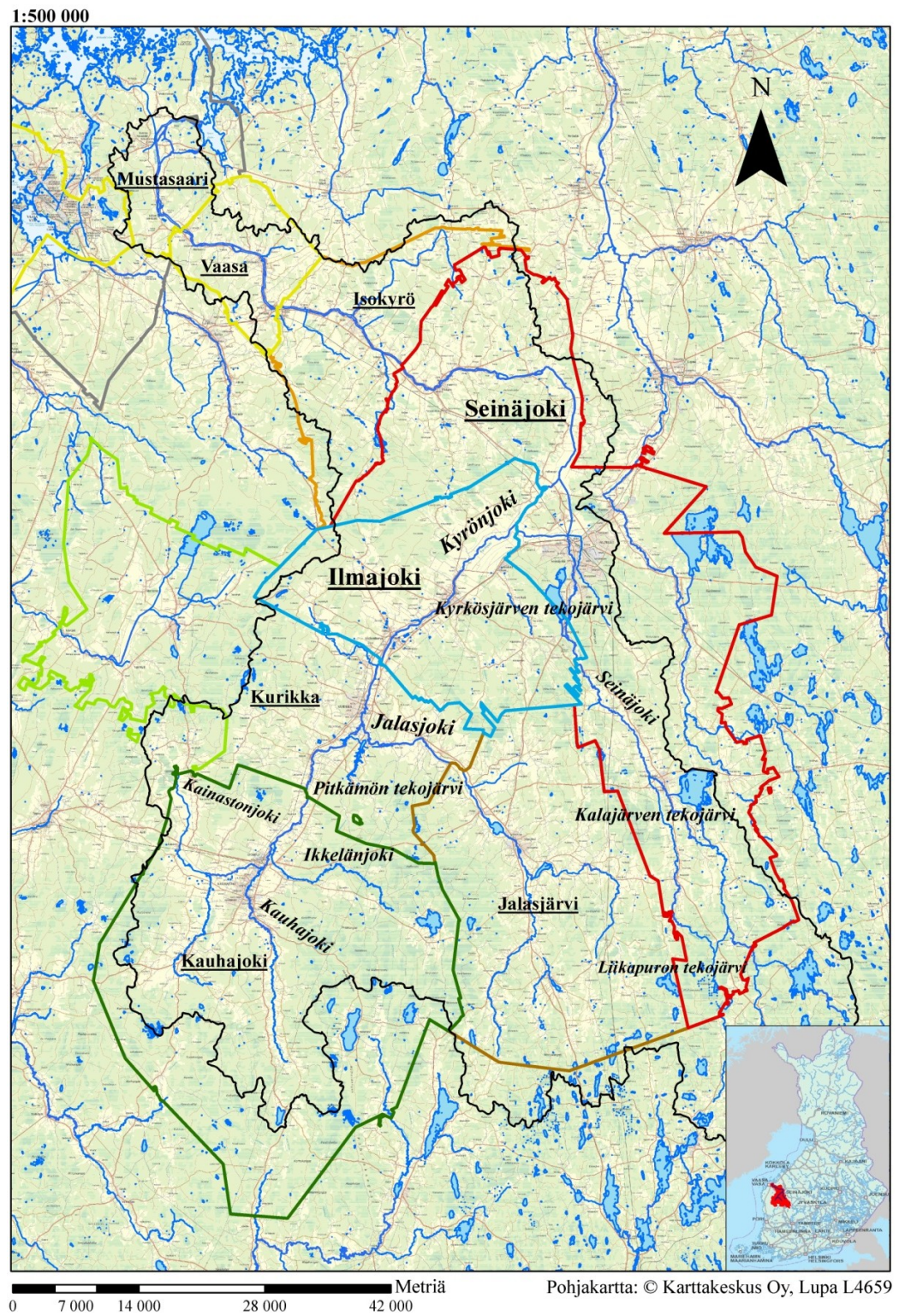


Kuva 1. Peltojen, metsien ja soiden osuus Kyrönjoen valuma-alueen eri osissa (Länsi-Suomen ympäristökeskus 2000b).

Kyrönjoen valuma-alueelle ovat ominaisia happamat sulfaattimaat, eli sulfaattipitoiset maa-ainekset, jotka ovat muodostuneet Litorina-meren aikana noin 5000–1000 e.Kr meren pohjalle sedimentoituneesta liejusavesta. Maan pH-arvo on yleensä alle 4 ja maa-aineksen sisältämä sulfidi on peräisin merivedestä. (Teppo ym. 2006: 9) Kyrönjoen vesistöalueella happamat sulfaattimaat sijaitsevat pääasiassa 60 m korkeustason alapuolella, eli joen keski- ja alajuoksun alueella. Kyrönjoen vesistörakentamisen historian aikana happamat sulfaattimaat ovat välillä hidastaneet ja estäneet rakennustöitä ympäristönsuojelullisista syistä johtuen. Veden pinnan laskiessa sulfidit hapettuvat rikkihapoksi, joka muodostaa veteen liukenevia ja vettä happamoittavia sulfaatteja. Eniten sulfaatteja pääsee veteen tilanteessa, jossa kuivaa kesää seuraa runsassateinen syksy. Näin sulfidit pääsevät ensin hapettumaan maaperän kuivuessa, jonka jälkeen sateet huuhtovat sulfaatteja veteen. (Teppo ym. 2006: 9) Koska Alasaarelan (1983) ja Erviön (1975) laskelmien mukaan vesistöalueen happamista sulfaattimaista noin 70 % on viljelykäytössä (ks. Teppo 2006: 9), voitaisiin pengerrysalueiden käytön ehkäisyllä kesä- ja syystulvatilanteessa vaikuttaa mahdollisesti myös jokiveden laadun parantamiseen, mikäli pelloilta jokeen tuleva hapen valuma vähenisi.

2.1 Kyrönjoki

Kyrönjoki on Etelä-Pohjanmaan suurin joki, jonka pääuoma alkaa Kurikasta Kauhajoen ja Jalasjoen yhtymäkohdasta. Kyrönjoen voidaan myös ymmärtää alkavan vesistöalueen eteläosassa sijaitsevasta Kauhajärvestä tai Kauhajoen ja Kainastonjoen yhtymäkohdasta Kauhajoen kunnan pohjoispuolella. (Orrenmaa 2004: 17) Kyrönjoen lähtöpaikka voidaan tulkita eri tavoin, koska joen latva-alue Suomenselällä on viuhkamainen. Kyrönjoen pääuomaan virtaavat Kauhajoen ja Jalasjoen lisäksi Seinäjoki ja Seinäjoen oikaisu-uoma. Kartta Kyrönjoen sijoittumisesta Etelä-Pohjanmaalle on esitetty kuvassa 2. Kuvaan on merkitty myös Kyrönjoen päävaluma-alue (musta raja), Ilmajoen, Seinäjoen ja muiden Kyrönjoen vesistöalueen kuntien rajat eri väreillä sekä alueen muita vesistöjä. Kyrönjoen päävirtaussuunta on etelästä pohjoiseen (Teppo 2006: 9). Joki laskee Pohjanlahden Vassorinlahteen Vaasan kaupungin koillispuolella (Etelä-Pohjanmaan ELY-keskus 2011: 4).



Kuva 2. Kyrönjoen päävaluma-alue (musta raja), Ilmajoen (vaalean sinisellä), Seinäjoen (punaisella) ja muutaman muun Kyrönjoen vesistöalueen kuntien kuntarajat sekä alueen vesistöjä. (Pohjakartta: Karttakeskus Oy, Lupa 4659)

Joen yläosan viljelysalueille on rakennettu suuret tulvapengerrysalueet (Kuva 7), joiden tarkoituksena on pitää kerran 20 vuodessa ja sitä useammin toistuvat tulvat joessa penkereiden välissä (Syvänen & Leiviskä 2007: 13). Kyrönjoen pääuoman pituus on eri lähteiden ja tulkintojen mukaan 134 km (Nuotio 2008: 74) tai 127 km (Länsi-Suomen ympäristökeskus 2000c). Kyrönjoki ulottuu, laskutavasta riippuen, 6 tai 8 kunnan alueelle ja sen valuma-alueella asuu yli 100 000 asukasta. Kyrönjoella on useita käyttötapoja; joessa on vesivoimaloita, Vaasan kaupunki ottaa joesta juomaveden valmistukseen käytettävän raakaveden, joillekin kunnille joki on puhdistettujen jätevesien purkupaikka ja useille ihmisille tärkeä virkistys- ja kalastuspaikka. (Nuotio 2008: 74)

2.1.1 Kyrönjoen virtaamista ja vedenkorkeuksista

Kyrönjoelle ovat ominaista suuret virtaama- ja vedenkorkeusvaihtelut. Vedenkorkeuden vaihtelu on suurimmillaan 7 m. Se on suurin Suomen jokivesistöissä havaittu vedenkorkeuden vaihteluväli. Pääuoman sekä kolmen sivujoen keski-, ali- ja ylivirtaamat on esitetty taulukossa 2. Pääuoman yli- ja alivirtaamien välinen ero voi olla jopa 500-kertainen. (Länsi-Suomen ympäristökeskus 2000a) Kyrönjoen virtaama on suurimmillaan kevättulvan aikaan huhti-toukokuussa. Kesällä virtaamat ovat yleensä alhaisimmillaan ja syksyllä virtaama nousee jälleen sateiden lisääntyessä ja haihdunnan vähentyessä. Tammi-maaliskuussa virtaama laskee lähelle kesän alhaisia arvoja. Virtaama voi kuitenkin nousta myös keskikesällä kovien vesisateiden takia tai talvella yllättävän lumensulamisen seurauksena. Tasaisen maaston ja uoman pienen koon takia Kyrönjoen virtaama on herkkä sade- ja lumimäärien vaihteluille. (Teppo ym. 2006: 24)

Taulukko 2. Kyrönjoen pääuoman ja sivujokien keski-, ali- ja ylivirtaamat (Länsi-Suomen ympäristökeskus 2000c).

Uoma	MQ [m³/s]	NQ [m³/s]	HQ [m³/s]
Pääuoma	45	1 *	493
Seinäjoki	8,5	0,3 **	150
Jalasjoki	8,5	0,3 **	130
Kauhajoki	8,9	0,0 **	142

* Vuosijaksolla 1981- 2004 (Syvänen & Leiviskä 2007: 8), ** (Vesihydro 1993)

2.1.2 Kyrönjoen tulvaherkkyydestä

Käsitys Etelä-Pohjanmaan alavuudesta ja tasaisuudesta voi olla harhaanjohtavaa, sillä Seinäjärvestä on merelle korkeuseroa 140 m. (Länsi-Suomen ympäristökeskus 2000a) Myös Kauhajärveltä on merelle pudotusta 144 m ja jokea pitkin matkaa 205 km (Orrenmaa 2004: 17). Kyrönjoen pääuoman tulvaherkkyys johtuukin osittain latvahaarojen suuresta pudotuskorkeudesta ennen niiden yhtymiskohtia, mikä nopeuttaa veden virtausta tasaisemmalle pääuoman alueelle. Tulvasuojellulla pääuoman alueella joen keskimääräinen kaltevuus on vain 4,1 cm/km. (Teppo ym. 2006: 14) Jo Ilmajoen ja Ylistaron välillä maa on erittäin tasaista 50 km:n matkalla. (Länsi-Suomen ympäristökeskus 2000a)

Kyrönjoen rannoilla on paljon turvepohjaisia peltoja, joille on tyypillistä maan painuminen. Alajoen tulva-alueella (Kuva 7) maanpainumisnopeus on noin 2 cm/vuosi. (Teppo ym. 2006: 14) Maanpinnan painuminen lisää peltöjen tulvaherkkyyttä, sillä myös tulvapenkereet painuvat ja niitä täytyy korottaa muutaman vuosikymmenen välein. Maanpinta laskee myös pellon pinnan eroosion myötä. (Turunen 1985: 286) Pohjanmaalla maankohoaminen on nopeampaa merenrannikolla kuin vesistöjen latva-alueilla, mikä vähentää maan keskikaltevuutta. Käytännössä maankohoaminen ei kuitenkaan hidasta jokien virtausta merelle, sillä kaltevuuden muuttuminen on erittäin hidasta. Kyrönjoen 160 km:n kokonaispituudella kaltevuuden väheneminen on alle millimetri kilometriä kohti sadan vuoden aikana. (Turunen 1985: 272)

2.2 Järvet, tekojärvet, ja voimalaitokset

Vesistönhallinnan parantamiseksi Kyrönjoen vesistöalueelle on rakennettu neljä tekojärveä; Kalajärvi, Kyrkösjärvi ja Liikapuro Seinäjoen valuma-alueella sekä Pitkämön tekojärvi. (Nuotio 2008: 75) Tekojärvien sijainti on merkitty kuvan 2 karttaan ja niiden valmistumisvuodet ovat taulukossa 1. Lisäksi vesistöalueella on yksityisen tilan säännöstelemä 1700-luvulla rakennettu Orisbergin Kotilampi (Koivisto ym. 2005: 5), joka sijaitsee Isonkyrön ja Seinäjoen kuntien rajalla. Suurimmat luonnonjärvet vesistöalueella ovat Seinäjärvi, Ikkeläjärvi ja Kurjenjärvi (Nuotio 2008: 75). Yhteensä vesistöalueella on yli 100 ha suuruisia järviä ja tekojärviä 16 kappaletta. Kuutta järveä säännöstellään ja niiden säännöstelytilavuus on yhteensä 75,6 milj.m³. (Syvänen &

Leiviskä 2007: 8) Kalajärven, Kyrkösjärven ja Pitkämön tekojärvien yhteyteen on rakennettu myös vesivoimalaitokset. (Koivisto ym. 2005: 5–6)

Pitkämön tekojärveen johdetaan vettä Kauhajoesta ja Jalasjoesta. Kyrkösjärveen johdetaan vettä Seinäjoesta täyttökanavaa pitkin. Järvestä johdetaan pois vettä voimalaitoksen ja tyhjennystunnelin kautta takaisin Seinäjokeen. Kalajärveen johdetaan vettä Seinäjoesta täyttöuomaa pitkin ja Kihniänjoesta kääntöuomaa pitkin. (Syvänen & Leiviskä 2007: 18–21) Tekojärvien (tummennetut nimet) ja kolmen suurimman luonnonjärven tilavuudet tai säännöstelytilavuudet sekä järvien vedenkorkeuden vaihteluvälit on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Kyrönjoen vesistöalueen järvien ja tekojärvien tilavuudet tai säännöstelytilavuudet ja vedenkorkeuden vaihteluvälit (Etelä-Pohjanmaan ELY-keskus 2011: 22; Länsi-Suomen ympäristökeskus 2000c).

Järvi	Tilavuus [milj. m ³]	Vedenkorkeuden vaihteluväli [m]
Kalajärvi	42 *	6
Kyrkösjärvi	11 *	2
Liikapuro	4,5 *	2,5
Pitkämö	6,5 *, **	10
Kotilampi	0,6 *	0,6
Seinäjärvi	11 *	1,5
Ikkeläjärvi	3,5	1,1
Kurjenjärvi	2,5	-

*säännöstelytilavuus, ** Säännöstelytilavuudesta käytössä käytännössä vain puolet.

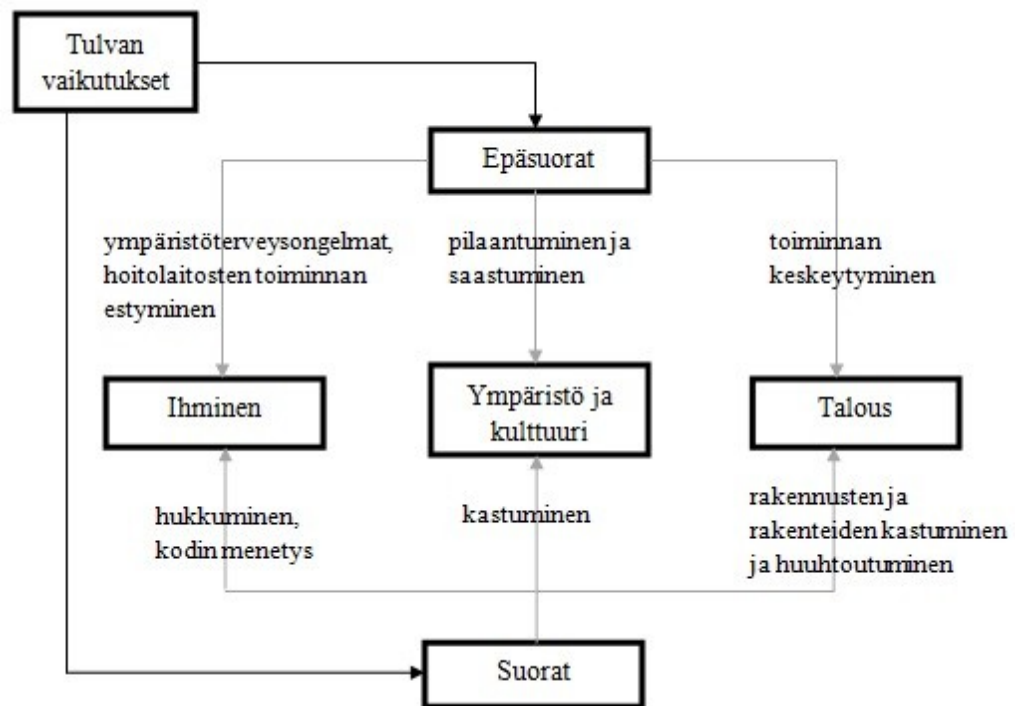
Kyrönjoen vesistöalueen tekojärvien ja Seinäjärven vedenpinnat lasketaan säännöstelyn alarajoille maalis-huhtikuussa ennen kevättulvia. Muina aikoina vedenpinnat pidetään yleensä lähellä säännöstelyn ylärajoja. Suuren kevätjuoksituksen lisäksi tekojärvien yhteydessä olevia voimalaitoksia lyhytaikaissäännöstellään. Tekojärvien säännöstely on havaittavissa virtaaman ja vedenpinnankorkeuden vaihteluina Kyrönjoessa järvien alapuolella. (Koivisto ym. 2005: 8) Pitkämön tekojärven avulla tehtävällä säännöstelyllä voidaan vaikuttaa alapuolisen jokiosuuden virtaamaan, kun säännöstely ajoitetaan tulva-aikana oikein. Tällä alueella sijaitsevat muun muassa Ilmajoen kunnan keskustaaajama ja Kyrönjoen yläosan tulvapengerrysalueet.

3 TULVAT, TULVARISKIT JA TULVAVAHINGOT

Suomen ympäristökeskuksen (2011) mukaan tulva tarkoittaa ”vesistön vedenpinnan noususta, merenpinnan noususta tai hulevesien kertymisestä aiheutuvaa maan tilapäistä peittymistä vedellä”. Suomessa kevättulvat aiheutuvat yleensä lumien sulamisesta ja jokiin syntyvistä jääpadoista. Lumen äkillinen sulaminen voi aiheuttaa tulvia myös talvella. Kesällä ja syksyllä tulvia aiheuttavat Suomessa runsaat sateet. Sääolosuhteiden lisäksi tulvimiseen ja tulvan vaikutuksiin vaikuttavat vesistöolosuhteet, alueen maankäyttö ja maaston muodot. Vaikka tulvat aiheuttavat erilaisia vahinkoja lähinnä ihmisille, on niillä tärkeä merkitys vesi- ja rantaluonnolle. (Suomen ympäristökeskus 2012a) Esimerkiksi tulvaniittyjen arvioidaan vähentyneen yli 80 % 1950-luvun jälkeen, mikä on johtunut pääasiassa tulvasuojelu- ja voimalaitosrakentamisesta (Suomen ympäristökeskus 2012b).

Tulvien haitalliset vaikutukset voidaan kuvan 3 mukaisesti jakaa suoriin ja epäsuoriin vaikutuksiin. Vaikutukset kohdistuvat yleensä ihmisiin, ympäristöön ja talouteen. Tulvien aiheuttamia suoria vaikutuksia ovat esimerkiksi rakennusten ja rakenteiden kastuminen ja vahingoittuminen sekä ihmisten mahdolliset hukkumiset ja kotien menetykset. Epäsuoria vaikutuksia ovat liiketoiminnan ja yhteiskunnan erilaisten toimintojen keskeytyminen, ympäristön pilaantuminen sekä veden ja ympäristön likaantumisesta aiheutuvat terveyshaitat. (Raivio & Lonka 2009: 6).

Tässä tutkimuksessa keskitytään pääasiassa suorien taloudellisten tulvavahinkojen vähentämiseen kehittämällä asutusalueiden ja viljelysten tulvasuojelua, vaikka ihmisten hengelle ja terveydelle aiheutuvat uhat nähdään yleensä tärkeimpinä ehkäistävinä tulvahaittoina. Toisaalta rakennusten tulvasuojelun parantamisella voidaan vaikuttaa edistävästi myös ihmishenkien ja terveyden suojeluun, mikäli tulvaveden pääsy rakennusten sisälle ja piha-alueille voidaan estää ja rakennuksen kastuminen siten estyy.



Kuva 3. Tulva vaikutusmekanismit mukaillen Raiviota ja Lonkaa (2009: 6).

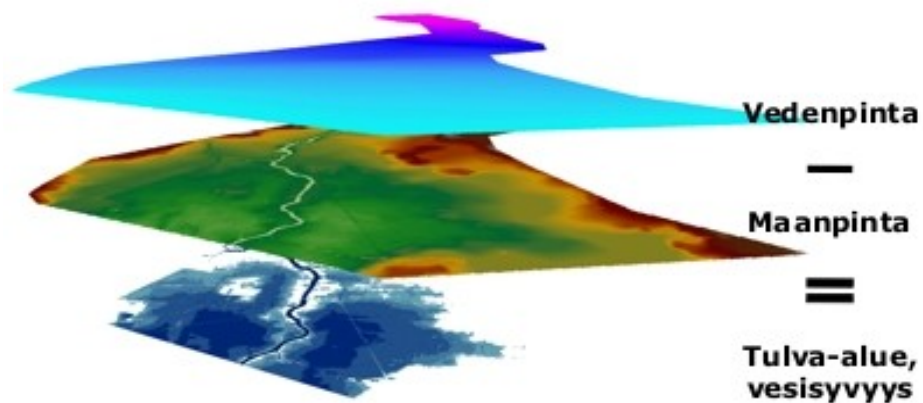
Tapahtuneen tulvan suuruutta kuvataan usein tulvan toistuvuusajan avulla. Suomen ympäristökeskuksen (2011) mukaan tulvan toistuvuus aika, eli tulvan todennäköisyys, tarkoittaa sen ajanjakson pituutta, mikä keskimäärin kuluu, ennen kuin tietyn suuruinen tai sitä suurempi tulva esiintyy uudelleen. Esimerkiksi kerran 20 vuodessa toistuva tulva esiintyy todennäköisesti kerran 20 vuoden aikana ja viisi kertaa 100 vuoden aikana. Tulvat eivät kuitenkaan esiinny säännöllisesti ja tulvan toistuvuus aika kertoo vain vuotuisen todennäköisyyden tietyn suuruisen tulvan esiintymiselle. (Suomen ympäristökeskus 2011) Kerran 20 vuodessa toistuvan tulvan vuotuinen todennäköisyys on siis $\left(\frac{1}{20}\right) \cdot 100 \% = 5 \%$. Käytännössä tulvan toistuvuus aika antaa vain tilastollisen dataan (virtaamiin tai vedenpinnankorkeuksiin tietyltä aikaväliltä) perustuvan arvion tulvan esiintymisen todennäköisyydestä.

3.1 Tulvariskien kartoittaminen ja tulvavaarakartat

Tulvariskillä tarkoitetaan Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2007/60/EY mukaan tulvan esiintymisen todennäköisyyden ja tulvan johdosta ihmisten terveydelle, ympäristölle, kulttuuriperinnölle ja taloudelliselle toiminnalle mahdollisesti aiheutuvien

vahingollisten seurausten yhdistelmää (2 artikla). Tulvakartoituksessa luodaan karttoja, joilla esitetään erisuuruisten tulvien tilanteissa veden leviämialue ja vedenpinnankorkeus tietyllä tarkastelualueella ja mahdollisesti muuta tulviin liittyvää paikkatietoa. Tulvakartat tehdään yleensä tulvan toistuvuusajan perusteella. Kartat voivat perustua historialliseen tietoon tulvien leviämialueista ja vedenkorkeuksista tai niillä voidaan esittää halutun suuruisen tulvan leviämialue tilastollisen hydrologisen tiedon avulla, vaikka tulva ei olisi ikinä toteutunut. Edellä kuvattua karttaa kutsutaan tulvavaarakartaksi. Tulvariskikartalla esitetään tulvan aiheuttama riski eri alueilla. Tulvariski lasketaan kaavalla: $\text{riski} = \text{todennäköisyys} \cdot \text{seuraukset}$, jossa $\text{seuraukset} = \text{vaara} \cdot \text{haavoittuvuus}$. (Suomen ympäristökeskus 2012c)

Tulvavaarakartat luodaan tulvamallinnuksen avulla. Tulvamallinnus perustuu tietokoneohjelmien – kuten ArcGIS – käyttöön, joilla tilastollisilla menetelmillä määritetyt vedenkorkeustiedot yhdistetään tutkittavan alueen maanpinnan korkeusmalliin (DEM). Korkeusmalli sisältää alueen topografian. Tulva-alueen vesisyvyys määritetään sitten vähentämällä vedenpinnan korkeusmallista maanpinnan korkeusmalli kuvan 4 mukaisesti. (Suomen ympäristökeskus 2012c)



Kuva 4. Tulva-alueen numeerinen mallinnus (Sane ym. 2006: 55).

Yksityiskohtaisen tulvavaarakartan laatiminen jokivesistölle vaatii virtausmallin avulla määritettyjä vedenkorkeustietoja. Lisäksi yksityiskohtaisessa tulvavaarakartoituksessa on käytettävä tarkkaa korkeusmallia. (Sane ym. 2006: 24) Nykyään lähes koko Suomen alueelta luodun Korkeusmallin KM2 tarkkuus on 0,3 m. Aiemmin käytössä olleen Korkeusmallin KM10 tarkkuus oli 1,4 m. (Maanmittauslaitos 2013) Virtausmallinnusta varten on oltava tiedossa joen pohjan geometriatiedot useilta poikkileikkauksilta

tutkittavalla jokiosuudella, lukuisia samaan aikaan mitattuja virtaama- ja vedenkorkeustietoja sekä jokiosuudella sijaitsevien siltojen, patojen ja muiden virtaamaan mahdollisesti vaikuttavien rakenteiden geometriatiedot.

3.2 Tulvariskien hallinta

Tulvariskien hallinta suunnitellaan ja toteutetaan tulvariskikartoituksen tulosten avulla ja hallintaa ohjaa lainsäädäntö. Lain mukaan ELY-keskusten tehtävä on laatia vesistöalueiden ja merenrannikon alustavat tulvariskien arvioinnit, ehdottaa kyseisten alueiden merkittäviä tulvariskialueita, tehdä alueille tulvavaara- ja tulvariskikartat sekä valmistella ehdotukset alueiden tulvariskien hallintasuunnitelmiksi. (620/2010, 4 §) Tämän tutkimuksen pääasiallisena tarkoituksena on tukea Etelä-Pohjanmaan ELY-keskusta laissa mainitussa tulvasuojelua ja muita tulvariskien hallintaa parantavien toimenpiteiden edistämiseksi (620/2010, 4 §) kehittämällä Kyrönjoen tulvapengerrysalueiden käyttöä. Tutkimus tukee myös Kyrönjoen vesistöalueelle tehtävää tulvariskien hallintasuunnitelmaa, sillä kyseisessä suunnitelmassa tulee esittää toimenpiteitä tulvariskien estämiseksi ja vähentämiseksi sekä selvittää mahdollisuudet vesistön säännöstelyn kehittämiseen ja tarve perkauksiin ja pengerryksiin (Suomen ympäristökeskus 2013).

3.2.1 *Direktiivi tulvariskien arvioinnista ja hallinnasta*

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivissä 2007/60/EY tulvariskien arvioinnista ja hallinnasta ohjataan Euroopan unionin jäsenvaltioiden tulvariskien kartoittamiseen, arviointiin ja hallintaan liittyviä asioita. Direktiivin tavoitteena on vähentää Euroopan unionin alueella esiintyvien tulvien vahingollisia vaikutuksia ihmisten terveydelle, ympäristölle, kulttuuriperinnölle ja taloudelliselle toiminnalle (1 artikla). Direktiivin mukaan jäsenvaltioiden on tehtävä merkittäviltä tulvariskialueiltaan tulvavaara- ja tulvariskikartat 22.12.2013 mennessä (6 artikla) ja tulvariskien hallintasuunnitelmat 22.12.2015 mennessä (7 artikla). Tulvariskien hallintasuunnitelmien osatekijät on tarkistettava säännöllisesti ja tarvittaessa päivitettävä vastaamaan sen hetkisiä tarpeita huomioiden ilmastonmuutoksen todennäköiset vaikutukset tulviin. (2007/60/EY) Kyrönjoen pengerrysalueiden käytön kehittäminen on siis nykyisten ilmastonmuutosskenaarioiden seurauksena ja syystulvien mahdollisesti yleistyessä

tarpeellista Kyrönjoen vesistöalueella. Direktiivin tavoite vähentää ”ihmisten terveydelle, ympäristölle, kulttuuriperinnölle ja taloudelliselle toiminnalle aiheutuvia vahinkoja” asettaa paineita myös asutusalueiden tulvasuojelun kehittämiseksi.

3.2.2 Laki ja valtioneuvoston asetus tulvariskien hallinnasta

Tulvariskien hallintaa ohjaavan lain (620/2010, 1 §) tarkoituksena on ”vähentää tulvariskejä, ehkäistä ja lieventää tulvista aiheutuvia vahingollisia seurauksia ja edistää varautumista tulviin”. Kesä- ja syystulvien kannalta laki siis ohjaa tulvasuojelutoimenpiteitä rakennusvahinkojen ehkäisemisen lisäksi myös satovahinkojen välttämiseksi. Lain avulla myös sovitetaan yhteen tulvariskien hallinta ja vesistöalueen muu hoito ottaen samalla huomioon vesivarojen kestävä käyttö ja suojeleminen (620/2010, 1 §). Laki voi siis rajoittaa esimerkiksi tulvasuojelurakenteiden rakentamista ja käyttöä sekä tulvasuojelutoimenpiteitä, mikäli ne aiheuttavat haittaa vesistölle. Kyrönjoen vesistöalueella vesivarojen kestävä käyttöön ja suojeleminen pyritään esimerkiksi sellaisilla tekojärvien säännöstelymenetelmiä, joiden avulla pyritään takaamaan jokeen minimivirtaama ja parantamaan veden laatua alivirtaaman aikana (Syvänen & Leiviskä 2007: 12). Laissa mainittu vesivarojen kestävä käyttö ja suojeleminen (620/2010, 1 §) ohjaa lisäksi huomioimaan tulvasuojelutoimenpiteissä alueen sulfaattipitoisen maaperän vaikutukset (Teppo ym. 2006: 9). Esimerkiksi pengerrysalueiden käyttö syystulvilla voi lisätä hapanta valumaa jokeen ja aiheuttaa siten haittaa kalataloudelle ja vedenhankinnalle.

Lain mukaan tulvariskien alustavan arvioinnin pohjana käytetään tietoja toteutuneista tulvista sekä ilmaston ja vesiohjauksen kehittymisestä ottaen huomioon myös ilmastomuutos (620/2010, 7 §). Suomessa tulvariskien alustavat arvioinnit on tehty EU-direktiivin vaatimuksen mukaisesti 22.12.2011 mennessä. Tulvariskien alustava arviointi sisältää merkittävien tulvariskialueiden tunnistamisen. (2007/60/EY) Merkittävä tulvariskialue on alue, jolla todetaan mahdollinen merkittävä tulvariski tai, jolla sellaisen riskin voidaan olettaa ilmenevän. Tulvariskin merkittävyyden arvioinnissa on huomioitava alueelliset ja paikalliset olosuhteet. Tulvariskin merkittävyyteen vaikuttavat tulvan todennäköisyyden lisäksi seuraavat tulvasta mahdollisesti aiheutuvat vahingolliset seuraukset:

- 1) vahingollinen seuraus ihmisten terveydelle tai turvallisuudelle;
- 2) välttämättömyyspalvelun, kuten vesihuollon, energiahuollon, tietoliikenteen tai muun vastaavan toiminnan, pitkäaikainen keskeytyminen;
- 3) yhteiskunnan elintärkeitä toimintoja turvaavan taloudellisen toiminnan pitkäaikainen keskeytyminen;
- 4) pitkäkestoinen tai laaja-alainen vahingollinen seuraus ympäristölle; tai
- 5) korjaamaton vahingollinen seuraus kulttuuriperinnölle. (620/2010, 8 §)

Lain mukaan tulvariskien hallinnassa on pyrittävä vähentämään edellä listattuja vahingollisia seurauksia (620/2010, 11 §). Kuitenkaan tulvariskien hallintakeinoilla ei voida aina täysin taata kaikkien listalla mainittujen vahinkojen välttämistä esimerkiksi suurtulvien aikana. Kyrönjoella suurtulvan sattuessa kesällä tai syksyllä tulvavettä voidaan joutua johtamaan pelloille korjaamattomien satojen päälle, jotta ehkäistään tulvavahingot Ilmajoen taajaman ja Kyrönjoen alajuoksun alueilla. Toisaalta nykyisillä tulvasuojelutoimenpiteillä ja -rakenteilla ei välttämättä pystytäkään suojaamaan esimerkiksi kaikkia Ilmajoen taajama-alueen rakennuksia, jos suurtulvan aikana pengerrysalueiden käyttöönottoa viivästytetään nykyisen tulvarajan (HW 1/20) ylityttyä.

3.3 Tulvavahinkojen korvauskäytännöt

Tulvavahinkolain mukaan vuoden 2013 loppuun saakka valtiolta voi hakea korvausta poikkeuksellisten tulvien aiheuttamiin vahinkoihin esimerkiksi korjatulle sadolle ja puutarhatuotteille, kasvavalle puustolle, rakennuksille, irtaimistolle, yksityisteille ja silloille. Tulva katsotaan poikkeukselliseksi, jos se on ollut suuruudeltaan tilastollisesti kerran 20 vuodessa toistuva tai harvinaisempi. Korvausta voidaan myöntää myös tulvan takia kylvämättä jäämisestä aiheutuneesta vahingosta viljelijälle. Lisäksi korvausta voi saada kustannuksista, jotka ovat aiheutuneet tulvavahinkojen torjumiseksi tehdyistä toimenpiteistä. Korvausta ei makseta, mikäli tulvavahinko olisi ollut vahingonkärсийн kohtuullisin toimenpitein estettävissä tai, jos vahinko on vähäinen. Valtio voi myöntää korvausta enintään 80 % arvioituista kustannuksista. (284/1983, 1 §, 2 §, 6 §; 1001/2011) 1.1.2014 alkaen valtio ei enää korvaa vesistötulvien aiheuttamia vahinkoja rakennuksille ja irtaimistolle, vaan korvauksia voi saada vain hankkimalla tulvavahinkovakuutuksen. (Maa- ja metsätalousministeriö 2012)

Poikkeuksellisen tulvan (kerran 20 vuodessa toistuva tai harvinaisempi) aiheuttamista vahingoista tietyille peltokasveille ja sopimusviljelyille puutarhakasveille sekä ulkona varastoidulle korjatulle sadolle voi hakea valtiolta korvausta vielä jatkossakin, sillä satovahinkojen korvaamisesta on säädetty erillinen laki, jota ei kumota vuonna 2014. Lain mukaan viljelijän omavastuuosuus viljelmän satovahingosta on 30 % normisadon arvosta ja valtio voi maksaa satovahinkokorvausta enintään viljelijän omavastuuosuudella vähennetyn satovahingon määrän. Korvauksia saavalla viljelijällä on oltava vähintään kolme hehtaaria peltoa viljelyksessä tai vähintään puoli hehtaaria avomaan puutarhakasvien tuotantoa. 100 € pienempiä korvaussummia ei makseta. Korvauksien maksulle on myös muita rajoituksia. Euroopan komission on hyväksyttävä satovahinkojen korvaukset. Satovahinkojen arviointia varten Maa- ja metsätalousministeriön asetuksella vahvistetaan vuosittain korvattaville kasvilajeille yksikköhinnat, jotka ovat joko interventiohintoja tai vahinkovuotta edeltäneen vuoden markkinahintoja. (1214/2000, 2 §, 4 §, 6 §, 8 §; 1002/2011, 8 a §)

Tulvavahinkovakuutuksia myöntää tällä hetkellä neljä vakuutusyhtiötä. Korvauskriteerit vaihtelevat eri vakuutusyhtiöissä esimerkiksi tulvan tai sateen poikkeuksellisuuden tulkinnan mukaan. Kun valtiolla kerran 20 vuodessa toistuva tulva katsotaan poikkeukselliseksi, voi vakuutusyhtiöllä poikkeuksellinen tulva olla vasta kerran 50 vuodessa toistuva. (Pekurinen 2013) Kyrönjoen yläosan penkereet suojaavat vanhat tulva-alueet vain kerran 20 vuodessa toistuvilta tulvilta. Mikäli tulvaveden johtamista pengerrysalueille viivästytetään useammin kuin kerran 50 vuodessa toistuvan, mutta harvemmin kuin kerran 20 toistuvan tulvan aikana, nousee vesi asutusalueilla useiden rakennusten tasolle. Tällainen käytäntö voisi aiheuttaa vaikean ristiriitatilanteen yksityisten rakennusten ja asuntojen omistajien sekä viljelijöiden etujen kannalta. Asuntojen omistajat eivät tällaisessa tapauksessa saisi vakuutusyhtiöltä korvauksia tulvavahingoista, mutta viljelijät olisivat todennäköisesti oikeutettuja satovahinkokorvauksiin valtiolta. Tulvavahinkojen korvauskäytäntöjen muuttuminen voi tämän seurauksena johtaa pysyvien tulvasuojelurakenteiden ulottamiseen myös sellaisille rakennetuille alueille, joita uhkaavat tilastollisesti kerran 50 vuodessa toistuvat tulvat.

4 KYRÖNJOEN TULVAT JA TULVASUOJELU

Vuonna 1965 valmistuneessa Kyrönjoen vesistöaloussuunnitelmassa määritettiin vesistön tulvanhallinnan periaatteet ja Kyrönjoen suuret tulvasuojelutyöt alkoivat. Kyrönjoen vesistöalueelle on valmistunut neljä tekojärveä ja neljä tekojärvien yhteydessä toimivaa vesivoimalaa, tulvapengerryksiä ja pumppaamoita sekä Malkakosken tekokoski. Myös Seinäjoen suosan 1968–1970 ja 1975–1982 rakennetulla oikaisu-uomalla on voitu vähentää joen alajuoksun tulvahaittoja (Syvänen & Leiviskä 2007: 12).

4.1 Tulvaongelmat Kyrönjoen yläosalla

Kyrönjoen tulvapengerryksalueilla harjoitetaan maanviljelystä ja alueiden välittömässä läheisyydessä on asutusta. Ennen tulvapengerryksalueiden rakentamista tulvat aiheuttivat alueella vahinkoja asuinkiinteistöille ja viivästyttivät keväisin kylvötoiden alkamista useilla vuorokausilla (Vaasan vesi- ja ympäristöpiiri 1993, K8 ja K9). 1900-luvulta muistetaan erityisesti kaksi vaikeaa tulvavuotta, 1953 ja 1966, jolloin tulvaveden alle jäi Kyrönjoen varrella noin 17 000 ha peltoa. Vielä vuoden 1984 keväällä koettiin vaikea tulva ennen suojelurakenteiden valmistumista. Taulukossa 4 on esitetty Kyrönjoen yläosan tulva-alueiden kokoja ennen tulvapengerryksalueiden ja muiden tulvasuojelurakenteiden valmistumista.

Taulukko 4. Kyrönjoen yläosan tulva-alueiden kokoja nykyisten pengerryksalueiden alueilla ennen tulvasuojelurakenteita (Vaasan vesi- ja ympäristöpiiri 1993 ja Vaasan vesipiirin vesitoimisto 1993, K6–K12).

Tulva-alue	Suurin tulva-alue [ha] aikana	Keskimääräinen kevättulva [ha] 1960 – 1980	Suurin kesätulva-alue [ha] 1960 – 1980	Tulva-alueen koko [ha] keväällä 1984
Rintala	3050 (1966)	-	-	3000
Tieksi	1800	840	500 (1961)	-
Iskala	450	180	20 (1961)	-
Halkosaari	1100	-	50	1150
Mikinneva	350	80	-	-
Kitinoja	-	95	5 (1961)	380

Ennen tulvapengerrysalueiden rakentamista tulvavesi pääsi leviämään joesta suoraan nykyisille pengerrysalueille eli pelloille. (Syvänen & Leiviskä 2007: 7) Pengerrysalueiden rakentaminen ei siis ole aiheuttanut peltöjen jäämistä veden alle tulva-aikoina, vaan sillä on estetty veden pääsy pelloille alemmilla vedenkorkeuksilla kuin HW 1/20.

4.1.1 Tulvien vaikutus satoihin

Nykyään Kyrönjoen yläosan tulva-alueet on suojattu tilastollisesti kerran 20 vuodessa toistuvaan vedenkorkeuteen asti pengerryksillä, mutta suuremmalla tulvalla alueille joudutaan johtamaan vettä. Sadon kasvukauden aikana tapahtuva tulva voi siis aiheuttaa pengerrysalueiden viljelijöille merkittäviä sadon menetyksiä. Kaitera (1941) on tutkinut vesipeiton vaikutusta rukiiseen, apilaan, timoteihin, kauraan ja ohraan. Kauralla seitsemän ja ohralla kuuden vuorokauden vesipeitto pienensi sadon neljäsosaan ja 12–14 vuorokauden vesipeitto tuhosi sadon kokonaan. Raivion (1961) havaintojen mukaan Kyrönjoen kesätulvan aikana 1961 jo kolmen vuorokauden täydellinen vesipeitto tuhosi kauran kokonaan. Kahden vuorokauden vesipeiton seurauksena sadosta tuhoutui 60 % ja yhden vuorokauden kestäneellä vesipeitolla 40 %. Tulva sattui tuolloin heinäkuun lopulla noin 60 vuorokautta kauran oraalille tulon jälkeen. Sen sijaan Tuonosen ym. (1981) mukaan vuoden 1979 useita vuorokausia jatkunut kesätulva heinäkuun lopulla ei vähentänyt merkittävästi kauran ja ohran satoja, mikäli vilja ei ollut kokonaan veden peittämä. Satomäärää pienensi jyrkästi viljan joutuminen veden alle kokonaan. Koko sadon tuhoutumisen aiheutti viikon kestänyt täydellinen veden alle joutuminen. (ks. Rantakokko 2002: 26)

Edellä mainittujen tutkimusten ja havaintojen perusteella voitaneen todeta, että eri kasvilajien kestävyys tulvavedessä vaikuttavat kasvin kasvuvaihe, vedenpinnan korkeus ja veden peittoaika. Viljelykasvien vedenkestävyydestä on tehty myös vahinkofunktioiden muodostamiseen tähtääviä tutkimuksia: Berning ym. (2000) ovat tutkineet tulvavahinkofunktion kehittämistä sokeriruo'olle ja Ganji ym. (2012) riisille. Tulvaveden aiheuttamat satovahingot eivät ole kuitenkaan ainoita veden aiheuttamia haittoja pelloilla: syystulvien aikana pelloille päästetyt tulvavedet voivat aiheuttaa liettymishaittoja ja kasata puintiolkia ja muuta materiaalia pelloille, mikä aiheuttaa

lisätöitä maanomistajille. Tulvavedet voivat myös lisätä hukkakauran leviämistä. (Rantakokko 2002: 13)

4.1.2 Jääpatotulvat ja suppotulvat

Kyrönjoen vesistöalueella esiintyy keväisin jäiden lähdön aikaan paikoittain jääpatotulvia, sillä joen jäät lähtevät yleensä ensimmäisenä liikkeelle joen yläjuoksulta. Alajuoksulle päin virtaavat jäälautat muodostavat siten helposti jääpadon alempana uomassa paikallaan olevien jäiden kanssa. (Etelä-Pohjanmaan ELY-keskus 2011: 29) Esimerkiksi vuonna 1985 jääpatojen aiheuttamia tulvia ilmeni Kauhajoella, Jalasjoella, Seinäjoella sekä Kyrönjoella Kurikka-Ylistaro välillä, Isonkyrön kunnan alueella, Lehmäjoella ja alueella Vähästäkyröstä jokisuuhun. Jääpatoja purettiin tuolloin kaivinkoneella ja räjäyttelemällä. Tyypillinen jääpadon esiintymispaikka Ilmajoen alueella on Palon sillan yläpuoli ja Kyrönjoen yläosan pengerrysalueiden alueella Saarakkalanrinta. (Syvänen & Leiviskä 2007: 29–31)

Suppojään muodostuminen Kyrönjoessa on hyvin harvinaista (Suomen Salaojakeskus Oy 2010: 14). Suppotulvia on esiintynyt esimerkiksi Kyrkösjärven tekojärven täyttökanavassa ja Seinäjoessa Seinäjärven alapuolisella alueella Holmanperä-Uitonperä välillä. Suppotulvia voidaan torjua vähentämällä Seinäjärven juoksutusta supolle otollisen muodostumisajankohdan aikana. (Syvänen & Leiviskä 2007: 31) Tässä työssä ei tutkita erikseen suppo- ja jääpatotulvien tulvanhallintakeinoja, sillä kyseiset tulvat ajoittuvat satokauden ulkopuolelle.

4.2 Ilmajoen tulvariskikartoitus

Ilmajoen kunnan taajama-alue sijaitsee Kyrönjoen yläosan varrella aivan tulvapengerrysalueiden eteläpuolella. Kunnan tarkempi sijainti on merkitty kuvan 2 karttaan. Ilmajoen on vuonna 2008 tehty tulvariskikartoitus, jonka tavoitteena oli selvittää ympäristöhallinnon, Ilmajoen kunnan ja muiden tahojen aineistojen avulla mahdollisesti tulvaveden alle jääviä toimintoja eri tulvatoistuvuuksilla. Tulvariskikartoitettu alue sijaitsee kuvien 5 ja 6 kartoilla näkyvältä Saarakkalanrinnalta (jätevedenpuhdistamon alue) joen yläjuoksulle eli etelään päin Kurikan keskustaan saakka. Tulvariskikartoituksessa on huomioitu sähköjakeluverkoston sekä puhelin- ja

tietoliikenneverkoston haavoittuvuus, tulvien vaikutus viemäriverkoston toimivuuteen, veden alle jäävät pilaantuneet maa-alueet, pohjavesialueen ja vedenottamon sijainti tulvavaara-alueella sekä tulvavaara-alueelle myönnetty rakennusluvut, mahdollisesti kastuvien rakennusten lukumäärä, käyttötarkoitus, väestönsuojakapasiteetti ja kerrosala eri tulvasyvyysvyöhykkeillä. (Ämmälä 2008: 3–4)

Tässä tutkimuksessa Ilmajoen tulvariskikartoitusta voidaan käyttää vertailuaineistona ja tukena selvitetessä tutkitun tulvavaara-alueen rakennuksia ja muita tulvariskikohteita. Ilmajoen kunnan tulvariskikartoitukseen mittaamia rakennusten haittakorkoja voidaan esimerkiksi verrata tulvaveden ulottumiseen ja vedenkorkeuksiin uusilla tulvavaarakartoilla ja etsiä siten suurimmassa vaarassa olevat rakennukset eri tulvaskenaarioilla. Haittakorot ovat korkeusarvoja, joihin tulvavesi voisi nousta ilman, että asuin- ja tuotantorakennuksille aiheutuu haittoja. Haittakorot on määritetty siten, että ne ovat rakennuskohtaisesti 10–30 cm alempana kuin maanpinta rakennuksen seinän vieressä. Jätevesipumppaamojen tapauksessa haittakorkeudet ovat luukkujen tasoja, joista tulvavesi menisi sisään. (Ämmälä 2008: 25) Muutamien rakennusten ja jätevesipumppaamojen haittakorkoja on esitetty kuvan 5 kartalla.

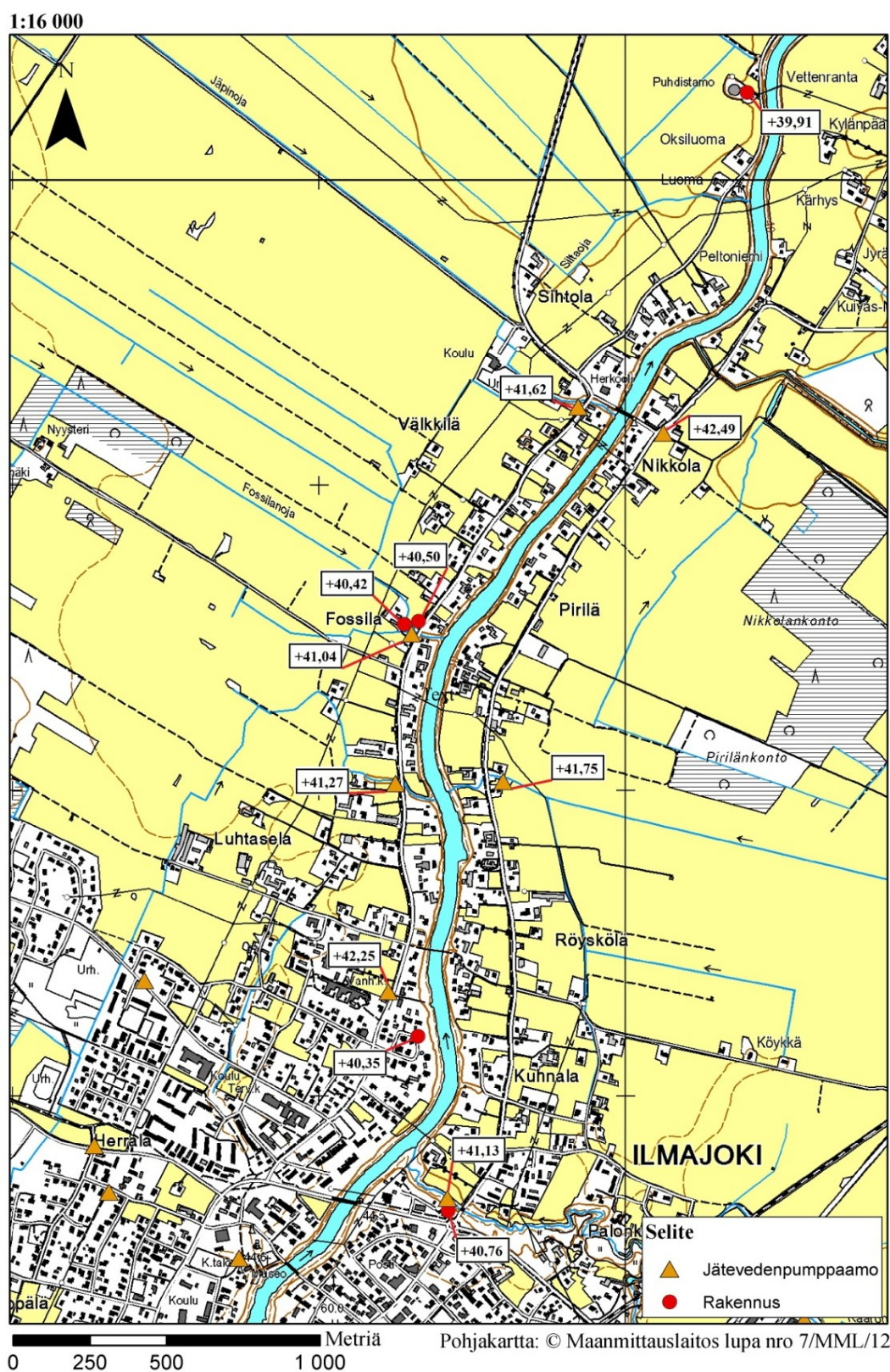
Ilmajoen tulvariskikartoituksen mukaan vain 16 rakennusta sijaitsee kerran 20 vuodessa toistuvan tulvan alueella. Näistä 6 on asuinrakennuksia. Ilmajoen kunnan väestötietojen perusteella HQ 1/20 tulva-alueella asuu 7 henkilöä. (Ämmälä 2008: 10) Taulukossa 5 on esitetty eri tulvatoistuvuusajoilla tulvan peittämällä alueella sijaitsevien rakennusten määrät ja mahdollisesti kastuvat kerrosalat.

Tässä tutkimuksessa taulukon 5 tietoja käytetään vertailuaineistona asutusalueen tulvavahinkofunktion luomisessa, mutta taulukon rakennusmäärien avulla ei lasketa tietyillä tulvatoistuvuuksilla syntyviä rakennusvahinkojen kustannuksia. Kerran tuhatvuodessa toistuvan tulvan tulva-alueella sijaitsee 18 ennen vuotta 1920 rakennettua rakennusperintökohdetta (Ämmälä 2008: 26). Kyseisiä rakennuksia ei kuitenkaan tässä tutkimuksessa eritellä tarkemmin luotaessa tulvavahinkojen kustannusfunktioita.

Taulukko 5. Tulvan peittämällä alueella Ilmajoella sijaitsevien rakennusten määrät ja mahdollisesti kastuvat kerrosalat eri tulvatoistuvuuksilla (Ämmälä 2008: 10–22).

Rakennusluokka	HQ 1/20 rakennusten määrä / kerrosala [m²]	HQ 1/100	HQ 1/1000
Asuinrakennus	6 / 665	28 / 2630	263 / 32830
Liikunta ja kulttuuri	-	1 / 575	2 / 800
Maa- ja metsätalous	4 / 3888	17 / 8831	76 / 25739
Oppilaitokset, asuntolat, palvelukodit	-	1 / 928	3 / 1063
Teollisuus ja liikenteen harjoittaminen	-	-	12 / 2105
Vapaa-ajan rakennukset, saunat ja talousrakennukset	5 / 334	23 / 885	131 / 7170
Yhdyskuntatekniikka	1 / 106	6 / 926	11 / 1260
Yhteensä:	16 / 4993	76 / 14775	498 / 70967

On huomattava, että Kyrönjoen tulviessa myös monet alueen uomat ja purot tulvivat, mikä voi aiheuttaa vahinkoja niiden lähellä oleville rakennuksille. Herkästi tulvivia uomia alueella ovat Tuoresluoma, Metiäisluoma, Nahkaluoma ja Tuomiluoma. (Ämmälä 2008: 44) Toisaalta tulvatilanteiden aikana on havaittu, että tulvavesi ei nouse kaikkiin tulvavaarakarttojen mukaan veden kanssa kosketuksiin joutuviin rakennuksiin. Tämä voi johtua esimerkiksi epätarkkuuksista karttojen luomisessa käytetyssä korkeusmallissa tai virtausmallinnustuloksissa. Lisäksi rakennukset on todennäköisesti rakennettu todellisuudessa korkeammalle kuin mitä tulvavaarakartta näyttää. (Yli-Mannila 2013)

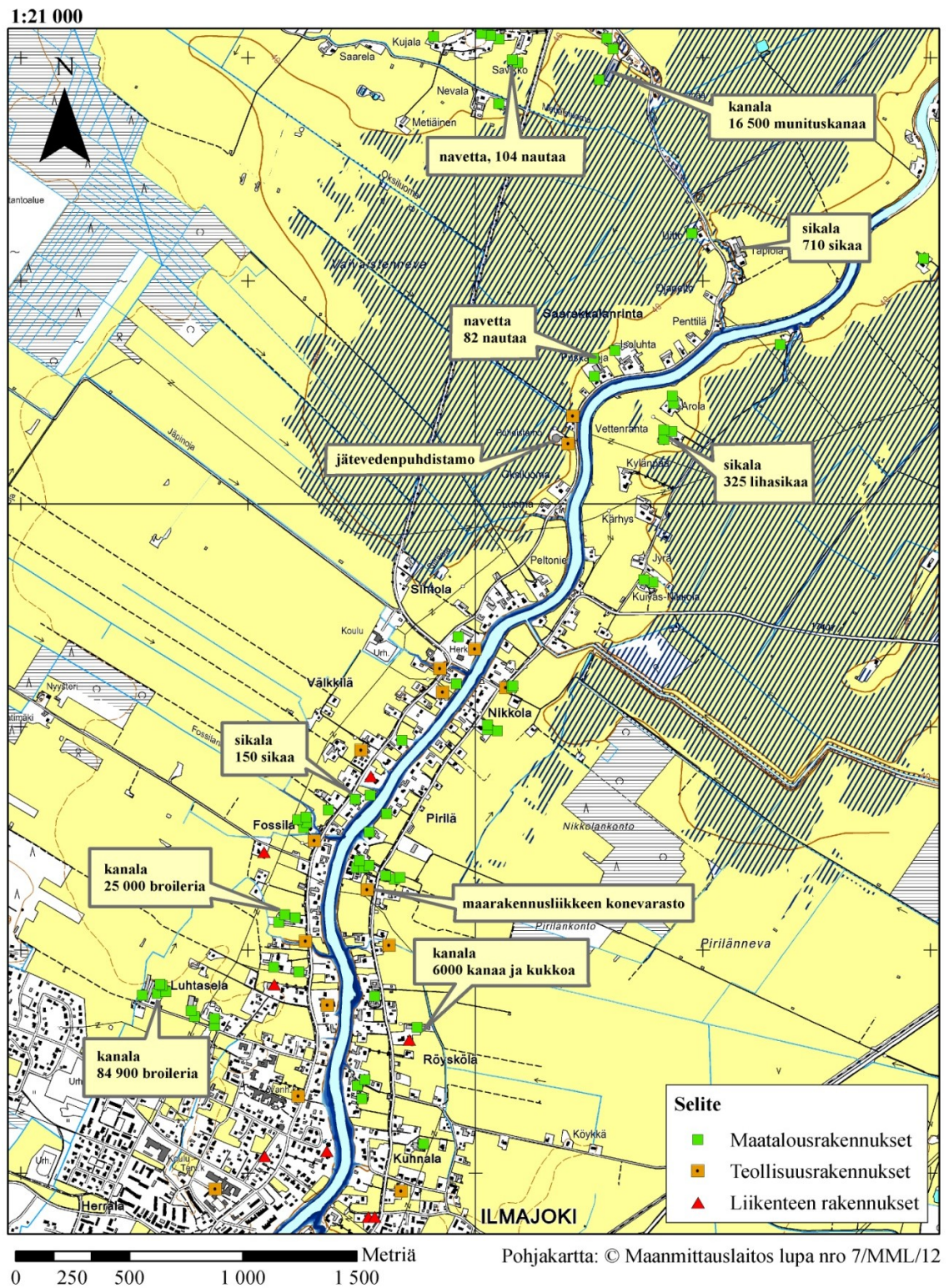


Kuva 5. Ilmajoen kunnan mittaamia haittakorkoja rakennuksille ja jätevedenpumppaamoille Ämmälää mukaillen (2008: 25) korkeusjärjestelmässä N₄₃. (Pohjakartta: Maanmittauslaitos lupa nro 7/MML/12).

Jätevedenpuhdistamon jääminen tulvaveden alle voi aiheuttaa suurehkon ympäristöriskin ja keskeyttää jätevedenpuhdistuksen. Ilmajoen jätevedenpuhdistamo ja jätevedenpumppaamot sekä muutaman pumppaamon haittakorot on merkitty kuvan 5 karttaan. Jätevedenpuhdistamon haittakorko on $N_{43} +39,91$ m. (Ämmälä 2008: 25). Puhdistamolle johdetaan kunnan jätevesiviemärin kautta tavallisten jätevesien lisäksi Ilmajoen Osuusmeijerin esikäsitellyt jätevedet. Mikäli jätevedenpuhdistamo jää veden alle kerran 100 vuodessa toistuvan tulvan aikana, täytyy jätevedet juoksuttaa puhdistamattomina Kyrönjokeen. Tämä aiheuttaa suuren ympäristöriskin, sillä meijerin jätevedet voivat maitotuotteita sisältäessään aiheuttaa ympäristössä maaperän happamoitumista, pohjaveden pilaantumista ja kalakuolemia. (Ämmälä 2008: 36) Lisäksi pilaantunut jokivesi voi haitata Vaasan seudun vedenhankintaa, sillä Vaasan vesi ottaa talousveden valmistukseen käytettävän raakaveden Kyrönjoen alajuoksulta.

Jo Kyrönjoen vedenkorkeudella HW 1/20 jätevedenpuhdistamon purkuviemäri voi jäädä tulvaveden alle, jolloin jätevedet leviävät ympäristöön sen sijaan, että ne purkautuisivat jokeen. (Ämmälä 2008: 35–36) Mikäli Kyrönjoen vedenpinta nousee riittävästi, jokivesi voi päästä jätevesiverkostoon. Kun jätevesiverkosto täyttyy jokivedellä, jätevesi nousee viemäreiden kautta talojen kellareihin. Jo HQ 1/20 tulvalla kastuva yksi jätevesipumppaamo nostaa veden muutamien talojen kellareihin. Joen vedenpinnan noustessa jätevesipumppaamojen ylivuotokynnyksiä voidaan korottaa, jotta jokivesi ei pääse viemäriverkostoon. Pumppaamoita on kuitenkin ensisijaisesti suojeltava tulvavedeltä, sillä ne toimivat sähköllä ja sähkökatkos tai pumppaamon kastuminen voi keskeyttää niiden toiminnan. (Ämmälä 2008: 37)

Ympäristön kannalta haitallisin teollisuusrakennus tulvatilanteessa on maanrakennusliikkeen konevarasto. Tulvan aikana rakennuksesta voi päästä ympäristöön polttoaineita, öljyä ja muita haitallisia aineita. Tulva-alueella on myös yhdeksän ympäristöluvanvaraista maatalousrakennusta. Rakennuksista neljä on kanaloita, kolme sikaloita ja kaksi navettaa. Yhteensä niissä on vuoden 2008 tietojen mukaan 133 771 eläintä. (Ämmälä 2008: 33) Ympäristön kannalta haitalliset rakennukset on merkitty kuvan 6 karttaan, jossa näkyy myös HQ 1/20 tulva-alue. Kartassa tulvapengerrysalueiden hyötyalue on merkitty vinoviivoituksella.



Kuva 6. Ympäristön kannalta haitallisia rakennuksia Ilmajoella Ämmälää (2008: 34) mukailten; (Pohjakartta: Maanmittauslaitos lupa nro 7/MML/12).

Myös tietoliikenneyhteydet voivat kärsiä tulvasta. Vaikka maakaapelit ovat 95 %:sesti vedenkestäviä ja hyvin suojattuja, pitkä kosteuskaltistus voi tehdä niistä toimintakyvyttömiä. Ilmajoella HQ 1/20 -tulvan alueella on kolme katujakokaappia, joiden rikkoutuessa 20 taloa jäisi ilman puhelin- ja tietoliikenneyhteyttä. Tulvaveden noustessa katujakokaapit voidaan ottaa pois päältä. Kerran 1000 vuodessa toistuvan tulvan alueella on kolme Fortumin puistomuuntamoja ja yksi Vattenfallin puistomuuntaja. Tuomolan (2008) mukaan Vattenfallin puistomuuntamon kastuessa neljä asiakasta ja Marttilan (2008) mukaan Fortumin muuntamoiden kastuessa 199 käyttöpaikkaa jää ilman sähköä. (ks. Ämmälä 2008: 39–41) Tässä tutkimuksessa suurin mahdollinen taajama-alueella tarkasteltava tulva-alue on kuitenkin niin pieni, että muuntamoita ei tarvitse huomioida erikseen asuinalueen vahinkofunktiossa. Suurimmalla tarkasteltavalla vedenkorkeudella tulvaveden ei pitäisi myöskään ulottua maanrakennusliikkeelle tai ympäristöluvanvaraisille maatalousrakennuksille.

4.3 Kyrönjoen tulvantorjunnan nykytilanne

Kyrönjoen vesistölle on laadittu tulvantorjunnan toimintasuunnitelma, johon on koottu vesistöalueen säännöstelylupien keskeinen sisältö ja tiedot alueen vesistörakenteista. Toimintasuunnitelmassa on myös arvioita tulvavahinkojen suuruudesta kerran 250 vuodessa toistuvan tulvan tilanteessa merkittävimpien jokiosuuksien alueilla. (Syvänen & Leiviskä 2007: 7) Kyrönjoen vesistöalueen tulvantorjunta perustuu nykyään väliaikaisten tulvasuojelurakenteiden ja -toimenpiteiden lisäksi pääasiassa yläjuoksulla olevien tekojärvien ennakoivaan käyttöön, veden päästämiseen tulvapengerrysalueille joen vedenpinnan noustua riittävän korkealle ja kevättulvien aikana jääpatojen purkuun.

4.4 Tulvasuojelurakenteet

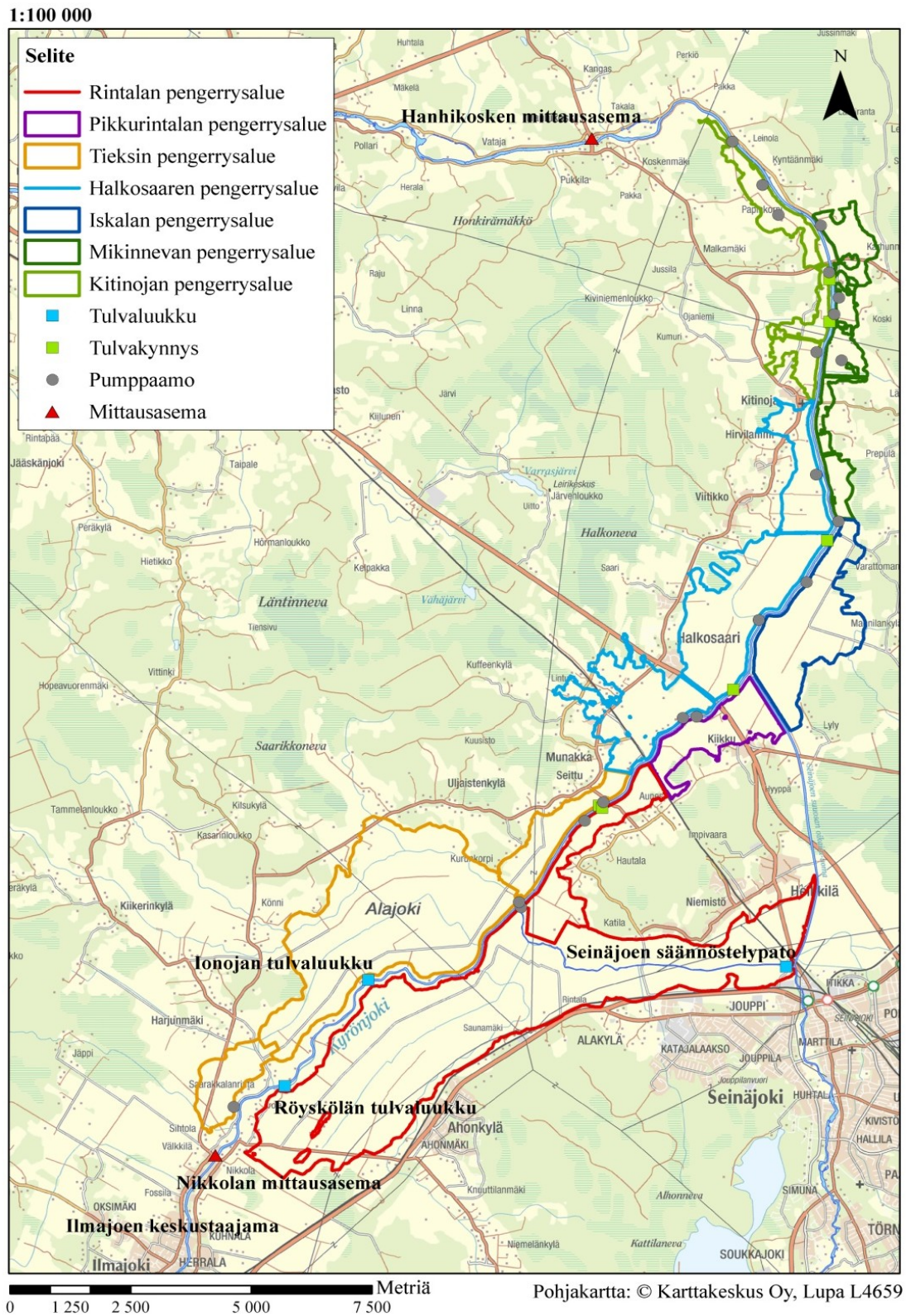
Kyrönjoen tärkeimpiä pysyviä tulvasuojelurakenteita ovat tekojärvet ja tulvapengerrysalueet. Lisäksi jokea voidaan mahdollisesti luvanvaraisesti perata ja tulvapenkereitä korottaa. Kyrönjoen tulvasuojelurakenteilla on suojattu yhteensä yli 10 000 ha peltoa. Tulvanhallintarakenteiden käyttö on suunniteltu siten, että vettä täytyy päästää tulvapengerrysalueille eli penkereiden suojaamille pelloille vasta Kyrönjoen virtaaman ylittäessä ylivirtaaman HQ 1/20. Myös pienemmät virtaamatilanteet vaativat

säännöstelyaltaiden hyvin ajoitettua käyttöä, jotta virtaamat pääuoman alueella eivät kasva liian suuriksi. Altaiden käytössä tarvitaan hyviä ennusteita tulovirtaaman kehittymisestä, ajoituksesta ja tulvan huipun suuruudesta. (Syvänen & Leiviskä 2007: 7)

Koko vesistöalueella on yhteensä 17 patoturvallisuuslain alaista patoa, joista 1-luokan patoja on 7, 2-luokan patoja 7 ja 3-luokan patoja 3 kappaletta (Syvänen & Leiviskä 2007: 16). Tulvapengerrysalueille ja Kyrönjoen vesistöalueelle rakennettiin vuosina 1980–2001 yhteensä 27 pumppaamoja (Syvänen & Leiviskä 2007: 12). Pumppaamojen tarkoituksena on pengerrysalueiden kuivanapito. Lisäksi alueilla on eristysojia, joiden tarkoituksena on pienentää pumppaamojen mitoitusvesimäärää (Vaasan vesi- ja ympäristöpiiri – Viatek Tapiola Oy 1993).

4.4.1 Tulvapengerrysalueet

Kyrönjoen yläosalla on kuusi pengerrettyä aluetta, joiden tarkoituksena on pitää pienemmät kuin kerran 20 vuodessa toistuvat tulvat joessa penkereiden välissä. Nämä ovat Rintalan, Tieksin, Iskan, Halkosaaren, Mikinnevan ja Kitinojan pengerrysalueet. Pikkurintalan alue kuuluu käytännössä Rintalan pengerrysalueeseen. Pengerrysalueiden ja niiden pumppaamojen sijainnit on esitetty Kuvan 7 kartassa. Kuvan mukaisesti pengerrysalueet ulottuvat Nikkolan pohjoispuolelta Ylistaroon ja Seinäjoen säännöstelypadolle saakka. Kuvasta puuttuu Pajuluoman pengerrysalue, joka sijaitsee Seinäjoen säännöstelypadon itäpuolella.



Kuva 7. Kyrönjoen yläosan tulvasuojelurakenteita (Pohjakartta: Karttakeskus Oy, Lupa 4659).

Patoturvallisuuslain mukaan tulvapenkereellä tarkoitetaan rakennetta, jonka tarkoituksena on estää veden leviäminen vesistön tai meren tavanomaista korkeamman vedenkorkeuden aikana. Patoturvallisuuslaki koskee myös tulvapenkereitä. (494/2009, 2 §, 4 §) Taulukossa 6 on tietoja Rintalan, Tieksin ja Halkosaaren pengerrysalueista ja niiden tulvaluukuista. Pengerrysalueiden kunnossapito kuuluu valtiolle. (Syvänen & Leiviskä 2007: 13)

Taulukko 6. Tietoja Kyrönjoen suurimmista pengerrysalueista ja niiden tulvaluukuista (Rantakokko 2002: 12).

Pengerrysalue Juoksutusaukko	Luukku (leveys x korkeus)	Kynnys- korkeus (N ₄₃ + m)	Aukkojen maksimijuoksutus- kapasiteetti (m ³ /s)	Teoreettinen varasto- tilavuus (milj.m ³)	Hyötyalue (ha)
Rintala				47,5	2600
Seinänsuun pumppaamo	juoksutus jokeen pumppaamon luukun kautta		20		
Röyskölän tulvaluukku	8 m x 4,5 m	36,10	90		
Seinäjoen säännöstelypato	2 kpl, 6 m x 5,7 m	34,00	150		
Tieksi				17,5	1700
Tieksin pumppaamo	juoksutus jokeen pumppaamon luukun kautta		20		
Ionojan tulvaluukku	6 m x 4 m	36,00	60		
Halkosaari				9,0	1030
Halkosaaren pumppaamo	juoksutus pumppaamon luukun kautta		10		

Tieksin ja Rintalan pengerrysalueilla on mahdollisesti yli 40 miljoonaa m³ varastotilavuutta käytettävissä. Jos alueille johdetaan Kyrönjoesta vettä esimerkiksi kolmen vuorokauden ajan, on joesta pienentyvä keskivirtaama noin 150 m³/s vastaavana aikana. Tosin tulvaluukkujen todellinen purkautumiskyky pienentää lukua. (Suomen Salaojakeskus Oy 2010: 52) Pengerrysalueita ympäröivien penkereiden harjakorkeus on joen rannassa noin 0,8–1 m korkeammalla kuin joen suunniteltu vedenpinnankorkeus. Penkereisiin on rakennettu tulvakynnyksiä poikkeuksellisten tulvatilanteiden varalle (Vaasan vesi- ja ympäristöpiiri – Viatek Tapiola Oy 1993). Kun vesi nousee joessa

riittävän korkealle, se virtaa tulvakynnysten kautta pengerrysalueille. Tieksin ja Rintalan tulvapengerrysalueet ovat alun perin olleet Kyrönjoen luontaisia tulva-alueita, mutta pengerrysten rakentamisen seurauksena vettä joudutaan päästämään alueille patoaukkojen kautta vasta joen virtaaman ylittäessä toistuvuuden HQ 1/20. Pengerrysalueiden aiheuttamia muutoksia joen virtaamatilaan kompensoidaan tekojärvien käytöllä. (Syvänen & Leiviskä 2007: 8)

Pengerrysalueiden rakentamisen tarkoituksena on ollut suojata Kyrönjoen vesistöalueen tulvavaarassa olevia asutusalueita tulvilta. Tässä tutkimuksessa tutkitaan tulvaveden johtamista vain suurimmille pengerrysalueille eli Rintalan, Tieksin ja Halkosaaren pengerrysalueille sekä kyseisillä alueilla syntyviä satovahinkokustannuksia. Rintalan pengerrysalue sijaitsee Kyrönjoen itäpuolella ja se ulottuu Nikkolan sillalta Seinäjoen oikaisu-uomaan. (Vaasan vesipiirin vesitoimisto 1993, K7) Tieksin pengerrysalue sijaitsee Kyrönjoen länsipuolella noin 15 km Ilmajoen keskustasta pohjoiseen ja se ulottuu pohjoisesta Munakan rautatiesillalta etelään Nikkolan maantiesiltään. (Vaasan vesipiirin vesitoimisto 1993, K6)

Halkosaaren pengerrysalueella on asutusta etelä- ja pohjoisosissa. Alue on maanviljelysalueita ja se alkaa Vaasa-Seinäjoki-maantiestä ja päättyy tulva-alueen poikki kulkevaan pengertiehen. Aluetta käytetään vesivarastona suurten tulvien ja jääpatotulvien aikana. Vaasa-Seinäjoki-maantie estää veden pääsyn Halkosaaren pengerrysalueelta Munakan asutusalueelle. Munakan asutusalue on suojattu Munakan rautatiesillan yläpuolelta alkavalla Jokikylän penkereellä, joka päättyy Vaasa-Seinäjoki-maantiehen. Jokikylän penkereen tarkoituksena on estää tulvaveden pääsy Tieksin pengerrysalueelta asutusalueelle. (Vaasan vesi- ja ympäristöpiiri 1993, K9)

4.4.2 Tekojärvet

Kyrönjoen vesistöalueen tekojärvistä ja niiden säännöstelystä on kerrottu tarkemmin tämän työn kappaleessa 2.2. Tekojärvien käytön merkitys vesistöalueen tulvasuojelussa ei ole aina yhtä suuri kuin tulvapengerrysalueilla. Niiden avulla on kuitenkin voitu vähentää joen alajuoksun tulvahaittoja ja taattu varastotilavuuden avulla jokeen tietty vähimmäisvirtaama, mikä on parantanut joen veden laatua kuivina aikoina (Suomen Salaojakeskus 2010: 16). Mahdollisuus tekojärvien käyttöön tulvatilanteessa riippuu

siitä, onko niissä säännöstelytilavuutta käytettävissä. Nikkolan sillan kohdalla $1 \text{ m}^3/\text{s}$ muutos virtaamassa vaikuttaa tulvatilanteessa noin 1 cm verran joen vedenkorkeuteen. Vedenpinnan alentamiseen 10 cm:llä Nikkolassa kahdeksi vuorokaudeksi vaaditaan siis säännöstelytilavuutta lähes 2 miljoonaa m^3 . (Suomen Salaojakeskus 2010: 55)

4.4.3 Tilapäiset tulvasuojelurakenteet

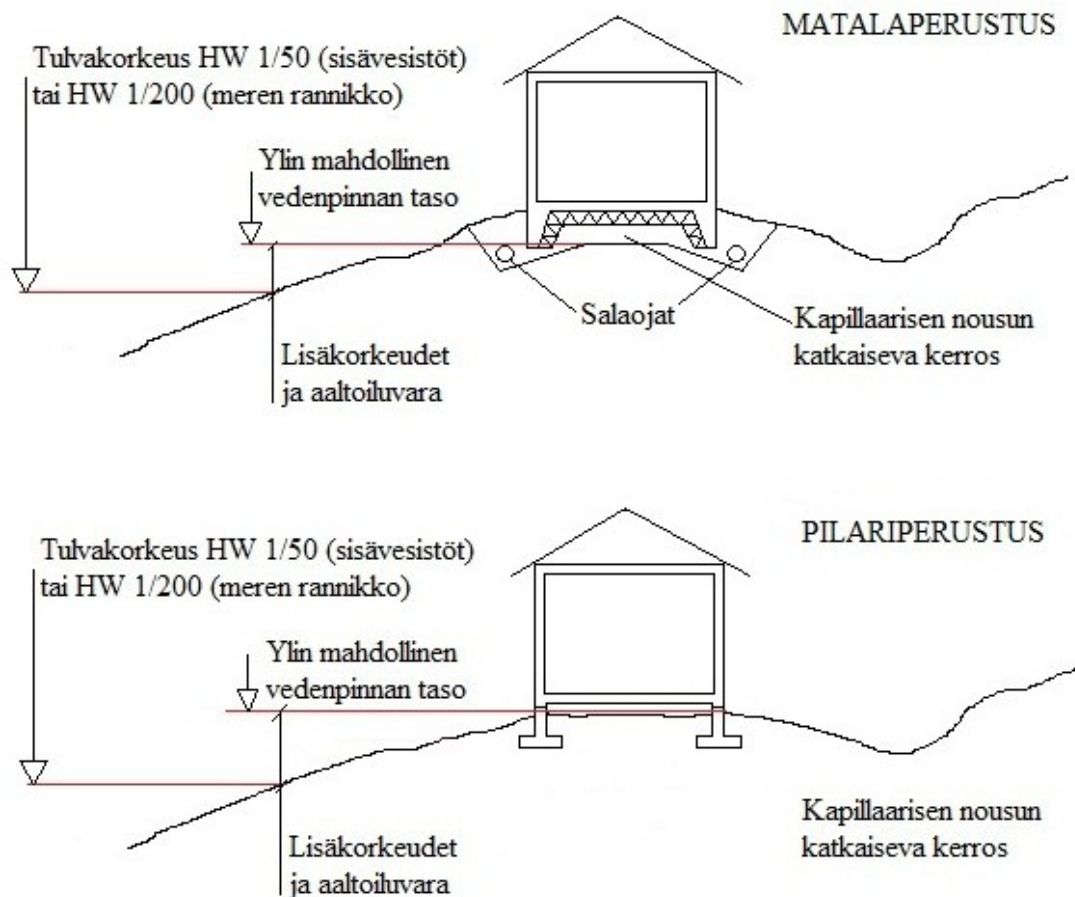
Yksittäisiä rakennuksia tai muita tärkeitä tulvaveden uhkaamia kohteita voidaan tulvatilanteessa suojata myös tilapäisillä tulvantorjuntarakenteilla. Tällaisia rakenteita ovat esimerkiksi pienet maa-aineksesta kasatut suojapenkereet, hiekkasäkit ja tilapäiset tulvaseinäkkeet ja settiaidat sekä rakennusmuovin kietominen rakennuksen alaosan ympärille. Olemassa olevia penkereitä voidaan myös väliaikaisesti korottaa tai padottavaan tulva- tai tiepenkereeseen voidaan tehdä aukkoja. (Syvänen & Leiviskä 2007: 41) Mikäli vesi uhkaa tulla kellariin lattiakaivon kautta, voi lattian ritiläkaivon tukkia muovilla ja riittävällä painolla. Myös wc-pytyt ja pesualtaat voi tarvittaessa tukkia tulvaveden nousun varalta. (ELY-keskus 2013: 6)

Vuoden 1984 tapahtuneen tulvan rakennuksille aiheutuneiden vahinkojen seurauksena Ilmajoen Sakarintien alueelle rakennettiin tulvasuojaksi matala pengerrys, jota voidaan tarvittaessa korottaa settiaidalla. (Suomen Salaojakeskus Oy 2010: 16) Tulvapenger ulottuu tasolle $N_{43} +40,86 \text{ m}$, mutta tulva-aikana vedenpinnan voidaan antaa penkereen kuivavaran takia nousta kyseisellä paikalla tasolle $N_{43} +40,48 \text{ m}$. (Suomen Salaojakeskus Oy 2010: 52)

4.4.4 Alimmat rakentamiskorkeudet

Tulvapengerrysten ja muiden tulvasuojelurakenteiden lisäksi tulvasuojelua voidaan tukea määräämällä vesistöjen ranta-alueille ja tulvavaara-alueille alimmat sallitut rakentamiskorkeudet. Vuonna 1984 vesihallitus laati suosituksen vesistöjen ylimpien vedenkorkeuksien huomioonottamisesta ranta-alueiden rakentamisessa. Ympäristöministeriön kautta kyseinen suositus päätyi myös kunnanhallituksille ja kuntien rakennuslautakunnille, joita Ympäristöministeriö kehotti kaavoituksessa ja rakentamisen ohjauksessa huolehtimaan rakennusten sijoittamisesta riittävän ylös tulvavahinkojen välttämiseksi. (Ollila 2002: 7)

ELY-keskukset suosittelevat määrittelemään alimman rakentamiskorkeuden kuvan 8 mukaisesti matalaperusteisille ja pilariperusteisille rakennuksille. Rakentamiskorkeuden on oltava sellainen, että vesi voi nousta siihen vahingoittamatta rakennusta. Ympärivuotiseen asumiseen tarkoitettut rakennukset tulisi sijoittaa korkeudelle, jossa niille voi aiheutua vahinkoa vasta kerran 100–200 vuodessa toistuvalla tulvalla. Koska näin harvinaisten vedenkorkeuksien arvioiminen on tilastollisesti vaikeaa, suositusten mukaan alin rakentamiskorkeus koostuu sisävesistöjen tapauksessa kerran 50 vuodessa toistuvan tulvan vedenkorkeudesta, johon lisätään vielä lisäkorkeus ja aaltoiluvara. Lisäkorkeus on 0,3–1 m. Aaltoiluvara on huomioitava lähinnä suurten selkien rannoilla. (Ollila 2002: 25–28)



Kuva 8. Alimman rakentamiskorkeuden määrittäminen erilaisilla perustamistyypeillä Ollilaa (2002: 25) mukaillen.

Tämän tutkimuksen tarkastelualueella alimmista rakentamiskorkeuksista Kyrönjoen rannalla määrää Ilmajoen kunta, joka käyttää määräysten perusteina Etelä-Pohjanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskuksen lausuntoja (Tervonen 2013). Alinta rakentamiskorkeutta koskevien suositusten mukaan lisäkorkeuden tulisi olla vähäjärvissä jokivesistöissä vähintään noin 1 m (Ollila 2002: 27). Etelä-Pohjanmaan ELY-keskus määrittelee uusien rakennusten alimman rakentamiskorkeuden aina kerran 100 vuodessa toistuvan vedenkorkeuden perusteella, kuten Maa- ja metsätalousministeriön työryhmän laatimassa raportissa on suositeltu (2003: 36). Kyseiseen korkeustasoon lisätään vielä paikasta riippuen noin 0,5–1,5 m lisäkorkeus. (Yli-Mannila 2013)

4.5 Toimenpiteet tulvatilanteissa

Etelä-Pohjanmaan ELY-keskus on Kyrönjoen vesistön säännöstelyyn liittyvien lupaehtojen haltija eli se vastaa Kyrönjoen vesistön säännöstelystä, pengerrysalueita koskevista säännöstelymääräyksistä ja tulvantorjuntaan liittyvistä säännöstelytoimenpiteistä. (Etelä-Pohjanmaan ELY-keskus 2011: 22) Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksen lisäksi tulvantorjunnan toimenpiteistä Kyrönjoella huolehtivat kunnat ja Pelastuslaitos, jotka voivat tarvittaessa hyödyntää evakuointisuunnitelmaa. Pelastuslaitos voi tulva-aikana hoitaa myös tulvavesien pumppausta kellareista, rumpujen aukaisemista ja tilapäistä pengertämistä.

ELY-keskusten suorittamia tulvantorjunnan ennakkoimenpiteitä ovat muun muassa jokien virtaamien ja vedenkorkeuden seuranta, säännöstelyn hoito ja ohjaus ennakoidun tulvatilanteen mukaan sekä ennakkotiedottaminen. Tulva-aikana keskeisiä toimenpiteitä ovat tämän lisäksi tulvasuojelurakenteiden, kuten patojen, pumppaamojen ja kynnysten käyttö, jääpatojen torjunta, yhteydenpito alueen toimijoihin sekä tiedottaminen. (Suomen Salaojakeskus Oy 2010: 15–16) Vesistön vedenkorkeus- ja virtaama-arvoja seurataan ja simuloidaan Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämällä vesistömallijärjestelmällä, joka hyödyntää ennusteissa muun muassa järjestelmään kirjattuja hydrologisia havaintotietoja ja Ilmatieteenlaitoksen säähavaintoja ja -ennusteita. (Etelä-Pohjanmaan ELY-keskus 2011: 22)

Kyrönjoen yläosan vesistötyön luvassa 27.4.1995 on määrätty, että vedenpinnan ylittäessä Nikkolan sillan mittauspisteellä korkeuden $N_{43} +40,00$ m tai Hanhikosken asteikolla lukeman 480 cm, täytyy Tieksin, Saarakkalan, Seitun, Halkosaaren ja Kiikun pumppaamot pysäyttää ja vettä päästää Tieksin, Rintalan ja Halkosaaren pengerrysalueille pumppaamojen ja säännöstelypatojen sekä tulvakynnysten kautta siten, että mainitut vedenkorkeudet eivät ylitä. Tulvatilanteen vaatiessa myös muiden pengerrysalueiden pumppaamot voidaan pysäyttää, mikäli se ei aiheuta vaaraa pengerrysalueiden asuinkiinteistöille. (Lupa nro 16–17/1995/2)

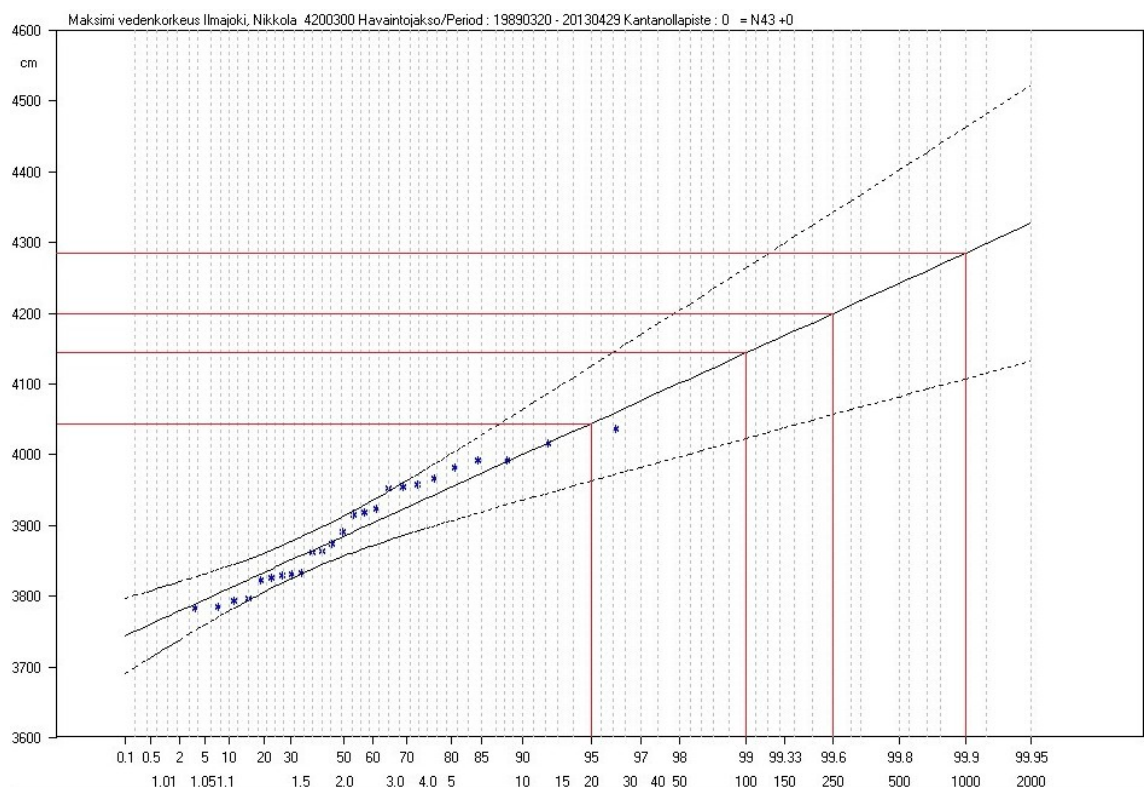
Mikäli tekojärvien juoksutus- ja säännöstelymääräyksiä ei voida noudattaa esimerkiksi luonnonolosuhteiden vuoksi, on veden johtaminen Rintalan, Tieksin ja Halkosaaren pengerrysalueille suoritettava siten, että kokonaisvahingot pengerrysalueilla ja alempana Kyrönjoen varrella jäävät mahdollisimman pieniksi. Kyseisille pengerrysalueille voidaan johtaa Kyrönjoesta vettä myös jo ennen kuin vedenkorkeus on ylittänyt edellä mainittuja lukemia Nikkolassa ja Hanhikoskella, mikäli pengerrysalueiden alapuolisella jokiosuudella syntyy tai voidaan perustellusti olettaa syntyvät huomattavia vahinkoja esimerkiksi jäiden takia. (Lupa nro 16–17/1995/2)

4.6 Joen tulvarajan määrittely

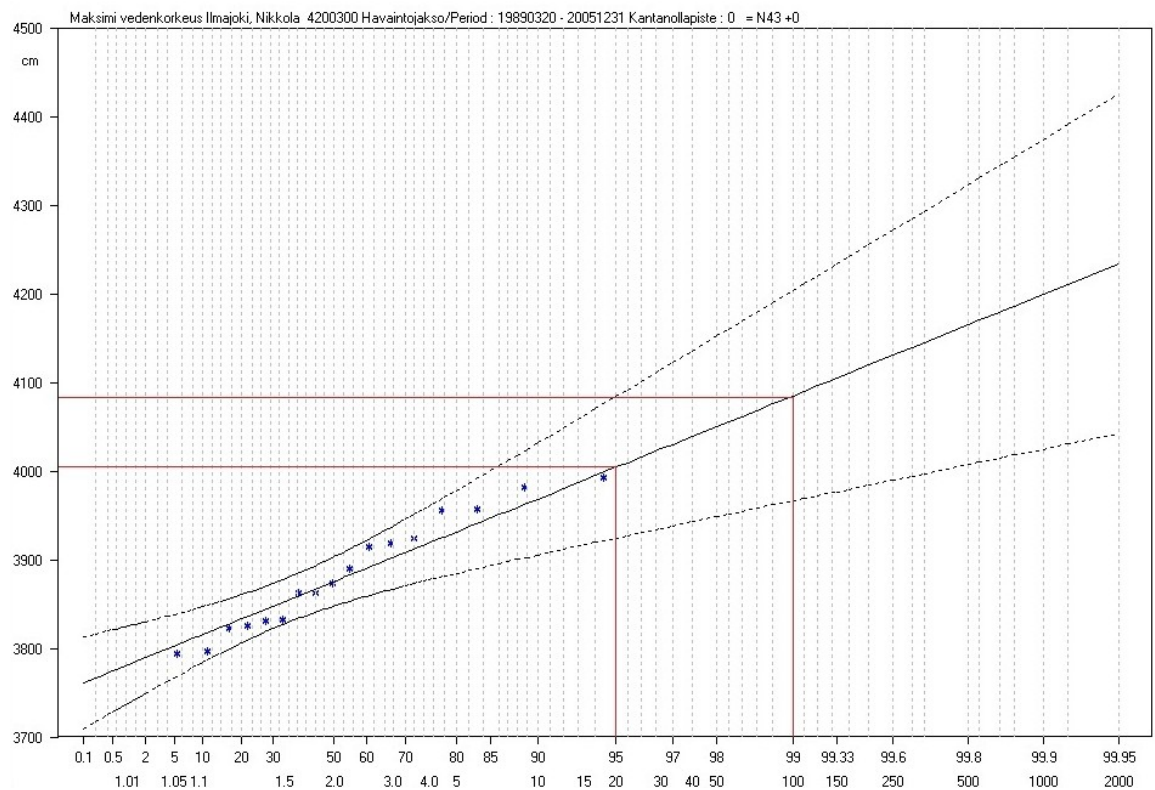
Kyrönjoen yläosan tulvapengerrysalueiden käyttöönoton kriteerinä pidetään vedenkorkeuden nousemista yli tason $N_{43} +40,00$ m Nikkolan sillan kohdalla ja se nähdään merkinä kerran 20 vuodessa toistuvasta tulvasta. Kyseinen vedenkorkeus tulvatoistuvuudelle 1/20 on kuitenkin määritetty jo vuonna 1995 (Syvänen & Leiviskä 2007: 26). Siksi on järkevää tutkia toistuvuusanalyysin avulla, mikä olisi Nikkolan sillan vedenkorkeus HW 1/20, kun uusin vedenkorkeusdata otetaan analyysiin mukaan. Suomen ympäristökeskuksen luomalla HYD-valikko -työkalulla tehtiin kaksi toistuvuusanalyysiä Nikkolan vedenpinnankorkeuksista. HYD-valikko suoritti toistuvuusanalyysit Gumbelin jakaumalla ja käytti kertymätodennäköisyyden laskentakaavana Weibullin kaavaa.

Ensimmäisen toistuvuusanalyysin kuvaaja on esitetty kuvassa 9, johon on merkitty punaisilla viivoilla muutaman tulvatoistuvuuden (1/20, 1/100, 1/250 ja 1/1000)

vedenkorkeudet. Kyseinen toistuvuusanalyysi hyödynsi vedenkorkeustietoja ajalta 20.3.1989–29.4.2013 ja sen perusteella tilastollisesti kerran 20 vuodessa toistuva vedenkorkeus Nikkolassa olisi $N_{43} +40,44$ m. Tämä vedenkorkeus vastaa tarkalleen syksyn 2012 tulvan vedenkorkeutta Nikkolassa. Kuvassa 10 on Nikkolan vedenkorkeuden toistuvuusanalyysin kuvaaja, johon käytettiin vedenkorkeustietoja ajalta 20.3.1989–31.12.2005. Kuvaajissa 9 ja 10 voidaan huomata selkeä ero kerran 20 vuodessa toistuvien vedenkorkeuksien välillä, sillä aikavälin 20.3.1989–31.12.2005 dataa käyttävä toistuvuusanalyysi antaa kerran 20 vuodessa toistuvaksi vedenkorkeudeksi Nikkolassa $N_{43} +40,05$ m. Toistuvuusanalyysi antaa samoilla aikaväleillä myös Skatilan ja Hanhikosken kerran 20 vuodessa toistuviksi virtaamiksi hieman suuremmat arvot, kun uusin virtaamadata on analyyseissä mukana. (Laitinen & Sirviö 2013)



Kuva 9. Nikkolan vedenpinnankorkeuden toistuvuusanalyysin kuvaaja 95 % luottamusväleillä aikavälillä 20.3.1989–29.4.2013 (Laitinen & Sirviö 2013).

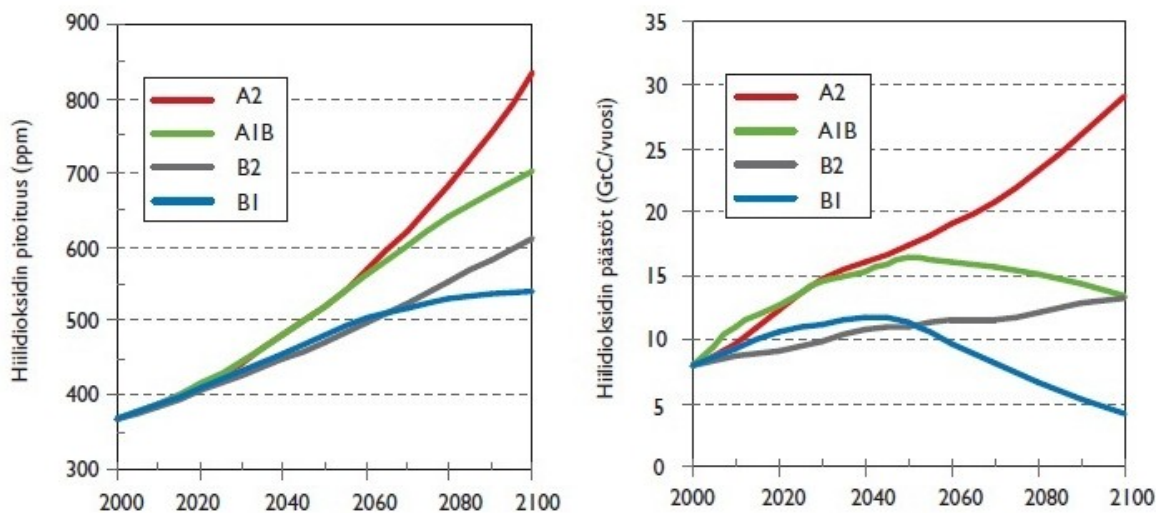


Kuva 10. Nikkolan vedenpinnankorkeuden toistuvuusanalyysin kuvaaja 95 % luottamusväleillä aikavälillä 20.3.1989–31.12.2005 (Laitinen & Sirviö 2013).

Vuosina 2010–2013 tapahtuneet tulvat saattavat vääristää aikavälille 20.3.1989–29.4.2013 tehtyjen toistuvuusanalyysien tuloksia nostamalla eri toistuvuusaikoja vastaavia vedenkorkeuksia. Lisäksi noin 17–25 vuoden aikaväli on melko lyhyt toistuvuusanalyysille, sillä suurten yksittäisten virtaamien vaikutus analyysiin korostuu. Myös nykyisen luvan kannalta on tässä tutkimuksessa järkevämpää käyttää Nikkolan sillan HW 1/20 arvona, eli joen tulvarajan määritelmänä, Kyrönjoen yläosan vesistötyön luvan (Lupa nro 16–17/1995/2) mukaista korkeutta $N_{43} + 40,00$ m.

5 ILMASTONMUUTOKSEN VAIKUTUS TULVIIN

Ilmastomuutoksen seurauksena Christensenin ym. (2007) mukaan ilmastomallisimulaatioiden tulosten perusteella Pohjois-Euroopassa keskimääräinen sademäärä kasvaa ja rankkasateet voimistuvat ja yleistyvät (ks. Aaltonen ym. 2008: 81). Voimakkaiden sadetapahtumien mahdollinen lisääntyminen johtuu siitä, että lämpimämpi ilmakehä voi sisältää suuremman määrän vesihöyryä. Ilmastomallien ja erilaisten päästöskenaarioiden avulla voidaan simuloida kasvihuonekaasupitoisuuksien nousua ja sen vaikutusta ilmastoon. Kuvassa 11 on esitetty hiilidioksidin kokonaispäästöjen ja ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kehitys ajan suhteen päästöskenaarioilla A1B, A2, B1 ja B2. Skenaariot eroavat toisistaan muun muassa väestönkasvun ja tekniikan kehityksen osalta. Kuvaajista nähdään, että kaikki neljä päästöskenaariota ennustavat ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kasvua kuluvaan vuosisadan aikana, vaikka maailmanlaajuiset hiilidioksidipäästöt vähenisivät nykyisestä tasosta. (Aaltonen ym. 2008: 79–80)



Kuva 11. Ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden ja hiilidioksidin kokonaispäästöjen kehitys ajan suhteen eri päästöskenaarioilla (Nakićenović & Swart 2000, ks. Aaltonen ym. 2008: 80).

Ilmastonmuutoksen seurauksena Kyrönjoen vesistöalueella lumen vesi-arvon maksimi tulee ennusteiden mukaan laskemaan referenssijakson 1971–2000 väliltä 80–120 mm 40–60 % (skenaario I, suuret lumen muutokset) tai 20–40 % (skenaario 15, pienet lumen muutokset) aikaväliin 2040–2069 mennessä. Lasku johtuu ilmastonmuutoksen seurauksena lisääntyvistä lämpimistä jaksoista ja lumen sulamisen aikaistumisesta Etelä-Suomessa. Lämpötilojen nousu ilmastonmuutoksen seurauksena lisää haihduntaa sekä maaperästä että järvistä. Suomessa haihdunnan on ennustettu kasvavan noin 5–10 % aikavälillä 2010–2039 ja noin 10–20 % aikavälillä 2040–2069 verrattuna aikaväliin 1971–2000. Eniten haihdunta kasvaa keväällä. Sadannan on taas ennustettu kasvavan Suomessa keskimäärin 3–17 % aikaväliin 2040–2069 mennessä. Kuitenkin valunta tulee kasvamaan vähemmän kuin sadanta haihdunnan kasvun seurauksena. (Veijalainen ym. 2012: 21–24) Suomessa valunta tulee ennusteiden mukaan kasvamaan keskimäärin 6–8 % aikavälillä 2040–2069 verrattuna referenssijaksoon 1971–2000. Suomen länsirannikolla valunta voi kuitenkin jopa vähetä noin 5 % vähäsateisimman skenaarion mukaan. (Veijalainen ym. 2012: 24) Silanderin ym. (2006: 6–7) mukaan valunta (mm/vuosi) voi Kyrönjoen vesistöalueella ilmastonmuutosskenaariossa RCAO-E-A2 mukaan kasvaa aikavälin 1961–1990 keskiarvosta 250–350 mm/vuosi välille 400–500 mm/vuosi aikavälillä 2071–2100.

Ilmastonmuutoksen seurauksena jokien keskivirtaama voi jopa kaksinkertaistua talvisin vuoteen 2100 mennessä aikaistuvan lumen sulamisen ja kasvavan sademäärän takia. Kuitenkin vähentävä lumimäärä johtaa Etelä-Suomessa jopa 50 % ja Pohjois-Suomessa 10–20 % laskuun keskimääräisten kevättulvien suuruudessa. Vuoteen 2100 mennessä on arvioitu Etelä- ja Keski-Suomen kerran 100 vuodessa toistuvien tulvien kasvavan noin 15 % ja kerran 20 vuodessa toistuvien tulvien noin 10 %. (Silander ym. 2006: 11) Kyrönjoen vesistöalueella tulvat tulevat ilmastonmuutoksen seurauksena joko pysymään ennallaan tai pienenevän, mikä johtuu pääasiassa kevättulvien pieneneemisestä. Sen sijaan syys- ja talvitulvat kasvavat. (Veijalainen ym. 2012: 73) Suomalaisen ilmakehänmuutoksen tutkimusohjelman, SILMUN, keskiskenaarion mukaan Suomessa talvet lämpenevät 6,6 °C ja talvisadanta lisääntyy 22 % vuoteen 2100 mennessä verrattuna referenssijaksoon 1961–1990. Etenkin Etelä- ja Keski-Suomessa talvitulvat tulevat mahdollisesti yleistymään. Talvitulvat voivat saavuttaa jopa kevättulvien suuruuden, sillä talvella haihdunnan puuttumisesta johtuva maaperän

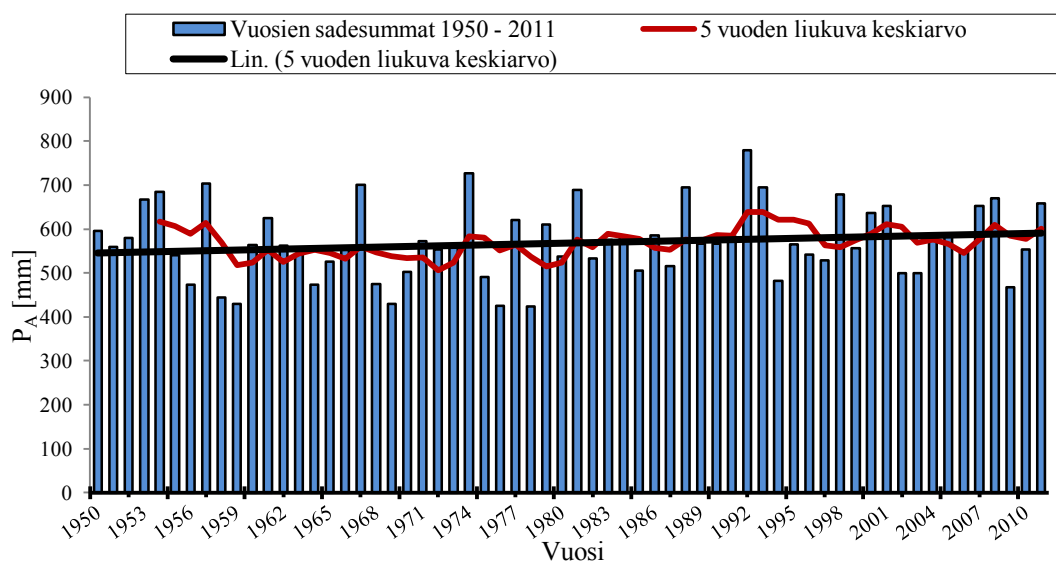
vetisyys lisää sadannan ja lumen sulannan vaikutusta. Kyrönjoella on jo 1980- ja 1990-luvulla sattunut muutamia suurehkoja talvitulvia. (Ollila 2002: 20)

Lumen vesiarvon pieneneminen saattaa pienentää ja aikaistaa lumen sulamisesta johtuvia kevättulvia Kyrönjoen vesistöalueella. Lumen sulamisen aikaistuminen talvella ei välttämättä nosta joen virtaamaa tulvatasolle, jos sulaminen tapahtuu riittävän hitaasti, eivätkä jäät aiheuta veden patoutumista. Haihdunnan lisääntyminen kesällä voi taas jonkin verran vähentää kesätulvien riskiä. Mikäli kuitenkin rankkasateet yleistyvät ja voimistuvat Kyrönjoen vesistöalueella, kasvaa myös kesätulvien esiintymisen todennäköisyys. Vaikka rankkasateita tulee esiintymään kesäisin, niiden suurin vaikutus painottunee syksylle, kun haihdunta on jo vähentynyt ilman lämpötilan laskun seurauksena, mutta sade tulee vielä vetenä. Ilmastomuutoksen seurauksena suurimmat tulvat Kyrönjoen vesistöalueella saattavat siten tulevaisuudessa siirtyä syksyille.

5.1 Kyrönjoen vesistöalueen sadantatiedot

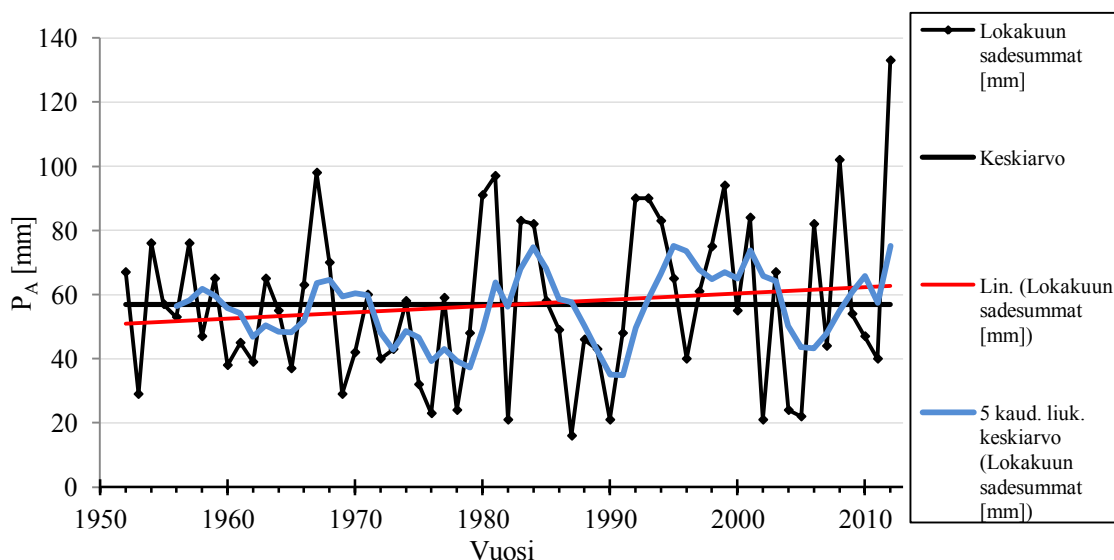
Kyrönjoen vesistöalueella keskimääräinen vuosisadanta aikavälillä 2001–2011 on Skatilan mittausaseman tietojen mukaan ollut noin 580 mm ja saman aikavälin toukokuyskuiden haihduntasummien keskiarvo Ylistaron Pelman mittausaseman tietojen mukaan noin 476 mm (Oiva 2013). Vastaava sademäärä aikavälille 1991–2000 on taas ollut 605 mm ja haihdunta 511 mm (Syvänen & Leiviskä 2007: 10). Vaikka alueen sadanta- ja haihdunta vaikuttaisi kyseisten lukemien perusteella vähentyneen, arvot edustavat suuruudeltaan kuitenkin melko normaaleja suomalaisia sadanta- ja haihduntamääriä. Lisäksi 20 vuoden aikaväli sadanta- ja haihduntamäärien muutoksen tarkastelussa on yleensä liian lyhyt. Kyseisten tietojen perusteella on siis vaikea arvioida sade- ja valuntamäärien muutosta alueella.

Kuvassa 12 on esitetty vuosittaiset sadesummat Kyrönjoen Skatilassa aikavälillä 1950–2011 ja datan viiden vuoden liukuvan keskiarvon käyrä. Viiden vuoden liukuvalla keskiarvolla on piirretty myös lineaarinen trendiviiva, joka osoittaa lievästi nousevaa trendiä. Koska vesistöalueelta on sadeaineistoa vain reilun 60 vuoden ajalta, voi kuvaajan nouseva trendi johtua myös pidemmän aikavälin luonnollisesta vaihtelusta.



Kuva 12. Aluesadantojen vuosittaiset summat aikavälillä 1950–2011 Kyrönjoen Skatilassa (Oiva 2013).

Uppalan (1978) mukaan lokakuun sademäärä Suomessa on vuoden suurin alle 3 % todennäköisyydellä. Kuitenkin syksyllä 2012 rankkasateista aiheutunut syystulva Kyrönjoen vesistöalueella tapahtui juuri lokakuussa. Kuvan 13 kuvaajassa on esitetty lokakuiden sadesummat (aluesadanta) Kyrönjoen vesistöalueella ajalta 1952–2012.



Kuva 13. Lokakuiden aluesadannan summat Kyrönjoen vesistöalueella vuosina 1952–2012, datan keskiarvo, dataan sovitettu lineaarinen funktio punaisella sekä 5 vuoden liukuva keskiarvo sinisellä (Oiva 2013).

Tässä kappaleessa esitetyt sadanta-arvot ovat Kyrönjoen vesistöalueen aluesadantoja, jotka on laskettu Suomen ympäristökeskuksessa hilapisteverkon avulla. Nykyisin käytettävillä Tretjakovin mittareilla mitattavat sadantamäärät ovat noin 10–20 % pienempiä kuin todellinen sadantamäärä. (Korhonen & Haavanlammi 2012: 147)

Kuvaajassa 12 voidaan havaita pieni nouseva trendi, johon vaikuttaa todennäköisesti lokakuun 2012 reilusti keskimääräistä suurempi sademäärä. Dataan sovitettuna lineaarisen funktion kaava on $y = 0,1961x - 331,93$. Kuvaajaan on piirretty myös datan 5 vuoden liukuvan keskiarvon käyrä, josta voidaan havaita hieman syklisyyttä. Syklit näyttäisivät noudattavan noin 10 vuoden aikajaksoa, mikä sopii Pohjois-Atlantin oskillaatiossa havaittuun sykliin (Pozo-Vázquez ym. 2001). Kyrönjoen vesistöalueen sadantatiedoista ei voi ainakaan vielä kovin selkeästi nähdä ilmastomuutoksen mahdollista vaikutusta alueen sadantamäärän kasvuun, vaikka molemmissa tutkituissa aikasarjoissa näkyi pieni nouseva trendi. Tosin sadantatietoja on kerätty alueelta vasta reilun 60 vuoden ajalta, mikä on melko lyhyt aikaväli ilmastomuutoksen vaikutusten tutkimiseen.

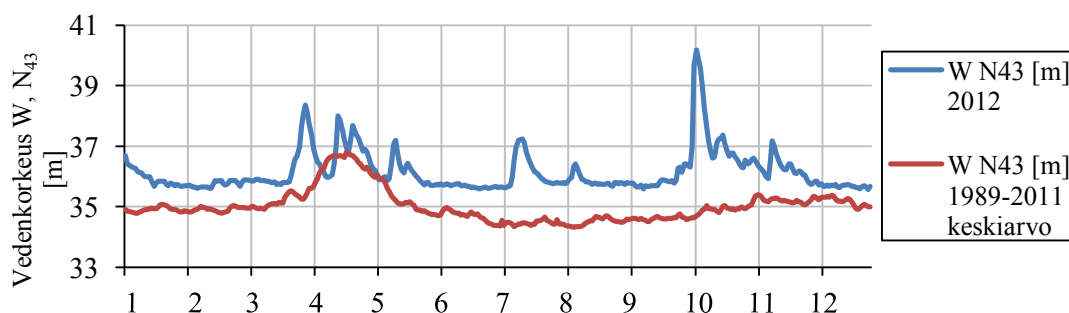
5.2 Ilmastomuutoksen vaikutus Kyrönjoen tulvanhallintaan

Ilmastomuutoksen seurauksena Kyrönjoen alueen sadannat ja virtaamat tulevat kasvamaan siten, että nykyään käytettävissä olevat säännöstelytilavuudet eivät tule olemaan tulevaisuudessa riittäviä tulvanhallintaan. Ilmastomuutoksen arvioidaan vaikuttavan tulvanhallintaan siten, että tekojärvien säännöstelykäytäntöjä joudutaan muuttamaan hydrologisten muutosten seurauksena. Ilmastomuutosennusteiden mukaan kevättulvat tulevat vaatimaan tekojärvistä nykyistä vähemmän varastotilaa lumimäärän vähentyessä ja lumien sulamisen aikaistuessaa. Sen sijaan talvella sateet tulevat ilmastomuutoskenaarioiden mukaan lisääntymään, joten altaiden varastotilan tarve talvisin voi kasvaa. Kesät ja syksyt aiheuttavat säännöstelyn hallinnassa ongelmia, sillä kuivien ja pitkien kesien takia altaisiin pitäisi varastoida kevään sulamisvesiä alivirtaamien nostamiseksi. Toisaalta kesän ja syksyn mahdollisia rankkasateita varten altaissa olisi oltava riittävästi varastotilaa. (Suomen Salaojakeskus Oy 2010: 22)

Syyssateiden ajankohtaa, suuruutta ja esiintymisaluetta on käytännössä mahdotonta ennustaa siten, että tekojärvien pinnan laskua etukäteen voitaisiin perustella tulevilla varastotilavuuden tarpeella. Kuitenkin Kyrönjoen yläosan pengerrysalueiden joustavan käytön kannalta syystulvien aikana olisi hyödyllistä, jos joen yläosan tekojärivistä löytyisi tarpeen tullen varastotilaa. Mahdollisesti tekojärvien säännöstelyssä voitaisiin pyrkiä laskemaan altaiden vedenpinnat mahdollisimman alas kesän ja alkusyksyn aikana ilman, että säännöstelystä aiheutuisi haittaa muulle vesistöalueelle. Tämä saattaisi kuitenkin aiheuttaa haittaa tekojärvien virkistyskäytölle. Myös pengerrysalueiden käytön optimoinnilla on suuri merkitys varautumisessa ilmastonmuutoksen vaikutuksiin, sillä niiden käyttö on Kyrönjoen tulvavaara-alueella ainoa merkittävä tulvanhallintakeino, mikäli tekojärviin ei voida tulvatilanteessa johtaa vettä. Virtaamien kasvuun ja tulvien yleistymiseen ilmastonmuutoksen seurauksena on varauduttava myös tulvavaara-alueen kaavoituksessa ja rakennuslupien myöntämisessä. Tulvavaara- ja tulvariskikartoitusten avulla Kyrönjoen vesistöalueelta voidaan löytää sellaiset rakennukset ja rakennetut alueet, jotka on tarpeen suojata pysyvillä tulvasuojelurakenteilla.

6 SYKSYN 2012 TULVA KYRÖNJOELLA

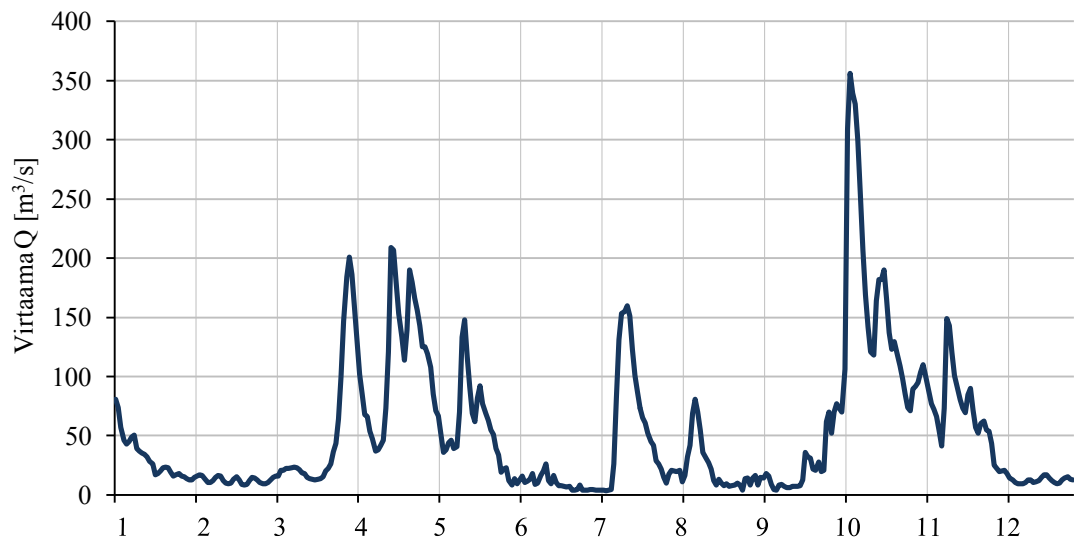
Syksyllä 2012 Kyrönjoen vesistöalueella tapahtui suuruudeltaan arviolta harvemmin kuin kerran 50 vuodessa toistuva rankkasateiden aiheuttama tulva. Nikkolan mittausasemalla vedenpinta ylitti 6.10.2012 lukeman $N_{43} +40,00$ m ja samana päivänä kello 11 jälkeen vettä alettiin päästää Rintalan ja Tieksin pengerrysalueille. Tulvaluukut aukaistiin vähitellen, jotta virtaus ei aiheuttaisi pelloille, teille, rummuille ja silloille turhaa vahinkoa. 7.10.2012 aamupäivällä alettiin vettä päästää myös Halkosaaren pengerrysalueelle. Näistä toimenpiteistä huolimatta vedenkorkeus Nikkolan mittausasemalla saavutti tason $N_{43} +40,44$ m, joka on alueelle tehdyn vanhan virtausmallinnuksen mukaan toistuvuudeltaan harvinaisempi kuin kerran 50 vuodessa toistuva tulvakorkeus $N_{43} +40,27$ m. (Yli-Mannila & Haukilehto 2013) Tulvapengerrysalueiden käyttö ei siis auttanut pitämään Nikkolan mittausaseman vedenkorkeutta tavoitetasolla $N_{43} +40,00$ m. Silti pengerrysalueilla tapahtuneiden satovahinkojen arvioidut kustannukset olivat suuruudeltaan yli nelinkertaiset verrattuna muihin Ilmajoen ja Seinäjoen kuntien alueilla syntyneisiin kustannuksiin. Kuvassa 14 on esitetty vedenkorkeusarvot Nikkolan mittausasemalla vuoden 2012 aikana. Kuvaajassa näkyy lokakuun kohdalla syystulvan aiheuttama tason $N_{43} +40,00$ m ylitys.



Kuva 14. Vedenkorkeus Nikkolan mittausasemalla vuonna 2012 ja vedenkorkeuden keskiarvo aikavälillä 1989–2011 (Oiva 2013). Kuukaudet ovat numeroituina x-akselilla.

Vedenpinnan korkeustason $N_{43} +40,00$ m ylittyminen Nikkolan sillan kohdalla tulvapengerrysalueiden käytöstä huolimatta johtui pitkään jatkuneista runsaista sateista. 6.10.2012 iltapäivällä oli Pitkämön tekojärvestä huomattu vedenpinnan ylittäneen sille asetetun ylärajan hälytysjärjestelmän vian takia. Tämän seurauksena Pitkämön tekojärvestä jouduttiin juoksuttamaan vettä Kyrönjokeen 7.10.2012, mikä osaltaan lisäsi

virtaamaa myös Nikkolassa. Pitkämöstä tehdyllä juoksutuksella ei kuitenkaan ollut vaikutusta tulvaluukkujen käyttötapaan tai -aikaan tulvan aikana. (Yli-Mannila 2013) Kuvassa 15 on Hanhikosken mittausaseman virtaamakäyrä vuoden 2012 ajalta. Kuvaajan x-akselilla on kuukaudet. Kuvaajassa lokakuun 2012 tulva näkyy poikkeuksellisen suurena virtaamana, joka on yli $350 \text{ m}^3/\text{s}$.



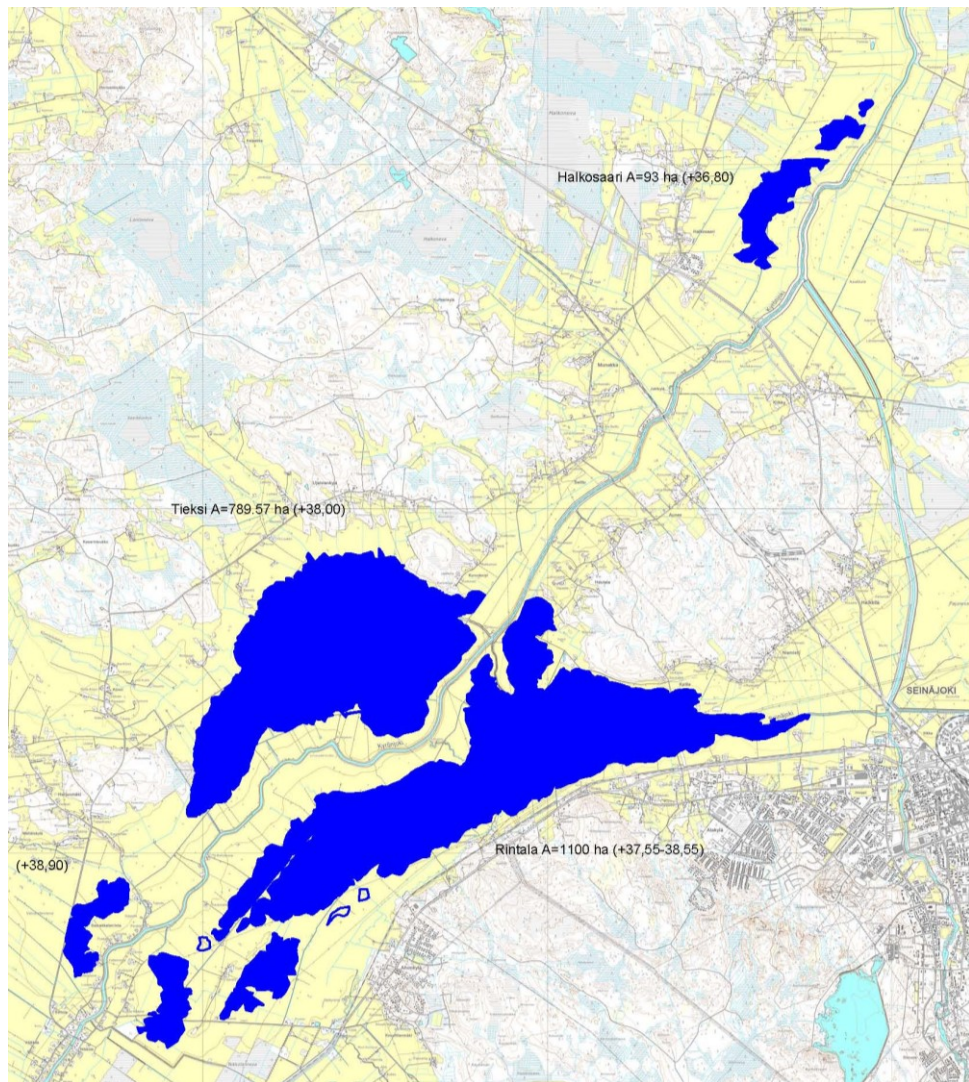
Kuva 15. Virtaamat Hanhikosken mittausasemalla vuoden 2012 aikana (Oiva 2013).

Tulvavesien takaisinpumppaus pengerrysalueilta Kyrönjokeen aloitettiin 9.10.2012 kello 9. Pumppaamojen normaalit käyntiasteet saavutettiin 20.–21.10.2012 ja vielä silloinkin pelloilla oli niin sanottua takavettä, joka virtasi pumppaamoille viiveellä. (Yli-Mannila & Haukilehto 2013) Osa Rintalan ja Tieksin pengerrysalueista oli siis veden peittämänä yli kaksi viikkoa, joten kaikki veden alle jääneet sadot tuhoutuivat varmasti. Kuvassa 16 on esitetty tulvan aikana pengerrysalueilla veden alle jääneet alueet ja taulukossa 7 on pengerrysalueilla veden alle jääneiden alueiden pinta-alat ja vesimäärät.

Tulvapengerrysalueiden lisäksi Kyrönjoen tulvavesiä levisi asutusalueille Tuoresluomasta Rantakujalle, Varikontielle ja Keskitielle, Tuomiluomasta Tuomikyläntielle sekä Kyrönjoen pääuomasta valtatie 67 varrelle Koskenkorvalla (Yli-Mannila & Haukilehto 2013). Kyrönjoen tulviminen aiheutti siis mahdollisesti tulvaveden padottavan vaikutuksen takia tulvaongelmia asutusalueille myös jokeen laskevien uomien ja ojien kautta.

Taulukko 7. Veden alle jääneet alat ja vesimäärät tulvapengerrysalueilla syksyllä 2012 (Huhtamäki 2013).

Pengerrysalue	Veden peittämä pinta-ala [ha]	Veden määrä [milj. m ³]
Rintala	1100	5,0
Tieksi	785	4,7
Halkosaari	121	0,2



Kuva 16. Veden peittämät alueet Kyrönjoen yläosan pengerrysalueilla syksyn 2012 tulvan aikana (Huhtamäki 2012).

Tulvaveden keskimääräinen virtaama pengerrysalueille voidaan laskea kaavalla

$$Q = \frac{V}{t}, \quad (1)$$

jossa V on tilavuus [m^3] ja
 t on aika [s].

Rintalan alueen Röyskölän tulvaluukkaa pidettiin 6.10.–8.10. auki yhteensä 190 500 s. Alueella mitattiin olevan vettä enimmillään noin 5 000 000 m^3 . Tulvaveden keskimääräinen virtaama Rintalan pengerrysalueelle oli siten

$$Q = \frac{5000000 \text{ m}^3}{190500 \text{ s}} \approx 26 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tieksin alueen Ionojan tulvaluukkaa pidettiin auki 6.10.–8.10. myös 190 500 s ja alueella mitattiin olevan enimmillään noin 4 700 000 m^3 vettä. Tulvaveden keskimääräinen virtaama Tieksin pengerrysalueelle oli siten

$$Q = \frac{4700000 \text{ m}^3}{190500 \text{ s}} \approx 25 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Halkosaaren tulvaluukkaa pidettiin auki 7.10. ja 8.10. yhteensä 105 300 s. Alueella mitattiin olevan vettä enimmillään 200 000 m^3 . Tulvaveden keskimääräinen virtaama Halkosaaren pengerrysalueelle oli siten

$$Q = \frac{200000 \text{ m}^3}{105300 \text{ s}} \approx 1,9 \text{ m}^3/\text{s}.$$

6.1 Syystulvan 2012 vahingot

Syksyn 2012 tulvan seurauksena Ilmajoen kunnalle lähetettiin 10 ja Seinäjoen kaupungille 2 korvaushakemusta tulvavahingoista. Yhteensä Kyrönjoen vesistöalueella sijaitseviin kuntiin tuli ainakin 125 korvaushakemusta. Taulukossa 8 on esitetty tulvavahinkolain nojalla korvattavat tulvavahinkosummat Ilmajoen ja Seinäjoen alueelta vahinkolajeittain vahinkokorvaushakemusten perusteella. Yhteensä korvaushakemuksiin perustuvien tulvavahinkojen suuruus molempien kuntien alueella oli 66 800 €. (Tuominen 2012)

Taulukko 8. Syksyn 2012 tulvavahinkojen suuruudet [€] Ilmajoella ja Seinäjoella vahingonkorvaushakemusten perusteella (Tuominen 2012).

Vahinkolaji	Ilmajoki	Seinäjoki
Peltokasvien korjattu sato	1 300	3 000
Puutarhavahinko	500	
Tie-, silta-, penger- ja ojavahinko	10 000	
Asuinrakennusvahinko	5 000	
Tuotantorakennusvahinko	25 000	
Vapaa-ajanrakennusvahinko	5 000	
Kotitalousirtaimistovahinko	10 000	
Muut kustannukset	2 000	
Tuote- tai tarvittava irtaimistovahinko	5 000	
Yhteensä:	63 800	3000

Taulukossa 9 on esitetty Ilmajoen ja Seinäjoen kuntien alueella (Rintalan, Tieksin ja Halkosaaren pengerrysalueet) tapahtuneiden satovahinkojen arvioidut kustannukset. Pengerrysalueilla syntyneiden satovahinkojen yhteenlaskettu summa on melko suuri, yli nelinkertainen, verrattuna Ilmajoen kunnan muihin tulvavahinkoihin. Halkosaaren alueen suuri vahinkokustannusarvio johtuu tulvaveden alle jääneestä suuresta porkkanasadosta (Ala-Luoma 2013). Satovahinkoihin on tässä tapauksessa laskettu vain pellossa tulvahetkellä kasvaneen sadon tuhoutuminen. Peltokasvien korjatun sadon kustannukset on nyt eritelty pengerrysalueiden ulkopuolisiin kustannuksiin, sillä niiden korvaus tapahtui tulvavahinkolain eikä satovahinkolain perusteella. Tulvavahinkojen korvauskäytäntöjen muuttuessa vuoden 2014 alusta myös peltokasvien ulkona varastoidulle korjatulle sadolle ja avomaan puutarhakasveille tapahtuneet tulvavahingot luetaan valtion taholta korvattaviksi satovahingoiksi (1002/2011).

Taulukko 9. Syystulvan 2012 aiheuttamat arvioidut satovahinkojen kustannukset [€] Rintalan ja Tieksin (Vaismaa 2013) sekä Halkosaaren (Ala-Luoma 2013) pengerrysalueilla.

Rintala	Tieksi	Halkosaari	Yhteensä
48 755	64 770	158 000	271 525

Edellä esitettyjen vahinkojen lisäksi syksyn 2012 tulvasta aiheutui Etelä-Pohjanmaan ELY-keskukselle kymmenien tuhansien eurojen kustannukset. Valtio vastasi tulvaveden pumppauksesta pengerrysalueilta takaisin jokeen Kyrönjoen erityissuojelulain mukaisesti (1139/1991, 4 §) sekä pumppaamoille ja pengerrysalueille aiheutuneiden vaurioiden korjaamisesta, kuten Länsi-Suomen vesioikeuden 1984 antamassa päätöksessä on asetettu. (Rautio 2013)

7 PENGERRYSSALUEIDEN KÄYTÖN OPTIMOINTI

Kyrönjoen yläosan tulvapengerrysalueiden käytön optimoinnin tarkoituksena on tutkia, voidaanko Kyrönjoen veden johtamista tulvapengerrysalueille viivästyttää vedenpinnan korkeuden ylittäessä tulvarajan $N_{43} +40,00$ m Nikkolan mittausasemalla. Koska pengerrysalueet ovat viljelyskäytössä, veden johtaminen kesä- ja syystulvien aikana alueille aiheuttaa viljelijöille satovahinkoja ja -menetyksiä. Ilmajoen taajama-alueella ja muualla alueen ympäristössä joen vedenpinnan nousu ei välttämättä johtaisi syystulvien aikana yhtä suuriin vahinkoihin kuin pengerrysalueilla.

Tässä tutkimuksessa ei oteta kantaa vaikutuksiin, joita vedenpinnan nousu yli mitoitusvedenkorkeuden penkereiden välissä aiheuttaa penkereiden vakavuudelle. Penkereet on mitoitettu siten, että niiden harjakorkeus on 0,8–1 m korkeammalla kuin joen mitoitusvedenkorkeus. Nykyisellä mitoitusvedenkorkeudella penkereiden varmuuskerroin on $\geq 1,3$. (Vaasan vesi- ja ympäristöpiiri 1993) Pengerrysalueiden käytön optimoinnissa on otettava huomioon monia alueiden käyttöön liittyviä rakenteellisia rajoituksia, kuten tulvaluukkujen käyttötapa ja virtaamakapasiteetti sekä penkereiden korkeus. Joen vedenpinnan ei voida antaa nousta niin korkealle, että vesi purkautuu pengerrysalueille virtaamalla penkereiden yli.

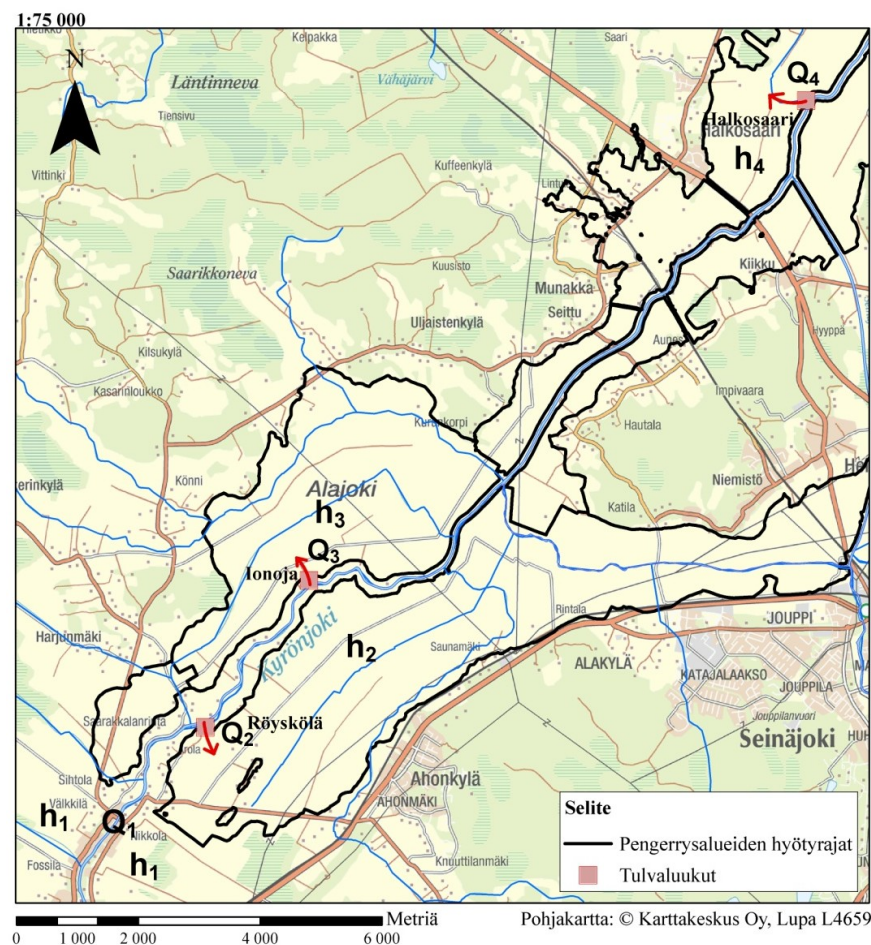
Tämän tutkimuksen tavoitteena on saada aikaan kustannusten minimointiin perustuvia suosituksia tulvapengerrysalueiden käytöstä etenkin syystulvien aikana. Tutkimuksessa otetaan huomioon myös tulvasuojelurakenteiden käytön rajoitukset ja ehdotetaan tarvittaessa muutoksia niiden rakenteeseen ja käyttöön. Nykyisten ongelmien lisäksi ilmastonmuutoksen seuraukset, kuten syystulvien mahdollinen yleistyminen, aiheuttavat paineita tulvasuojelurakenteiden ja -käytäntöjen muuttamiselle.

7.1 Ongelman käsitteellinen malli ja käsittelytapa

Optimointiongelman käsitteellisen mallin luomiseksi Kyrönjoen yläosalla sijaitseva tarkastelualue jaetaan aluksi tulvapengerrysalueisiin eli peltoihin ja niiden ulkopuolisiin asutusalueisiin. Tässä tutkimuksessa tarkastelualueen laajuuteen ja rajaukseen vaikuttavat suurimman tarkastellun tulvatilanteen virtaama ja veden nousukorkeus sekä

siitä johtuva tulvaveden leviämisala. Optimointiongelman ratkaisemisella halutaan selvittää kustannuksiltaan pienimmät vaihtoehdot, joissa tulvavesi peittää tulvapengerrysalueilla ja niiden ulkopuolella tietyn suuruiset alueet erilaisissa tulvatilanteissa. Ongelmalle luodaan kustannusten summaa kuvaava tavoitefunktio, josta selvitetään funktiota minimoimalla optimaaliset tulvavirtaamat pengerrysalueille ja niiden ulkopuolelle jokeen eri virtaamatilanteissa.

Optimointiongelman käsitteellistä mallia kuvaava kaavio on esitetty kuvan 17 kartalla. Kuvassa h_1 tarkoittaa vedenpinnan korkeutta asutusalueella, h_2 Rintalan pengerrysalueella, h_3 Tieksin pengerrysalueella ja h_4 Halkosaaren pengerrysalueella. Q_1 kuvaa virtaamaa Kyrönjoessa Nikkolan sillan kohdalla, Q_2 Röyskölän tulvaluukusta menevää luukun käyttöaikavälin keskimääräistä virtaamaa, Q_3 Ionojan tulvaluukun keskimääräistä virtaamaa ja Q_4 Halkosaaren pumpppaamon luukun keskimääräistä virtaamaa.



Kuva 17. Kaaviokuva ongelman käsitteellisestä mallista (Pohjakaartta: Karttakeskus Oy, Lupa 4659).

Käsitteellinen malli esittää siis tulvavirtaaman jakautumisen joen ja pengerrysalueiden tulvaluukkujen välille. Joen vedenpinnankorkeus ja veden levittäytymislaajuus asutusalueilla ovat riippuvaisia joen virtaamasta. Samoin pengerrysalueilla vedenkorkeus ja veden alle jäävä peltoala ovat riippuvaisia tulvaluukkujen läpi kulkevasta keskimääräisestä virtaamasta tietyllä aikavälillä.

Jokea ei voida yksinkertaistaa liikkumattomaksi, järven kaltaiseksi vesitilavuudeksi siten, että jaettaessa vesitilavuutta pengerrysalueiden ja asutusalueen välillä ei tarvitsisi ottaa huomioon tulvaluukkujen ja joen virtaamia. Optimointiongelman tavoitefunktion luominen on riippuvainen virtausmallinnuksesta, sillä vain virtausmallinnuksen avulla saadaan tietää, miten joen virtaaman kasvu vaikuttaa vedenpinnan korkeustasoon ja veden leviämiseen asutusalueella. Tässä tutkimuksessa tulvaluukkujen käytön aiheuttamaa muutosta joen virtaamaan ja vedenkorkeuksiin eri paaluväleillä ei ole kuitenkaan erikseen mallinnettu, sillä niin tarkka tutkimus olisi vaatinut useiden virtausmallinnusten ja tulvakarttojen tekoa. Sen sijaan on oletettu, että tulvaluukkujen joesta yhteensä poistama virtaama poistuu joesta koko sen tarkasteluväliltä.

Kyrönjoen Nikkolan sillan purkautumiskäyrän ja koko jokialueen virtaaman ja vedenkorkeuden riippuvuuden tutkimiseksi mallinnettiin virtausmallinnusohjelma HEC-RAS 4.0:lla joelle erisuuruisia virtaamatilanteita. Virtausmallinnusta varten alueen geometria luotiin siten, että vettä ei johdeta tulvapengerrysalueille ollenkaan, vaan joen vedenpinnan annetaan nousta virtaaman kasvaessa. Mallinnuksen tavoitteena oli selvittää Kyrönjoen veden leviämistapa erilaisissa tulvatilanteissa Ilmajoen ja Seinäjoen asutusalueille. Virtausmallinnuksesta saatuja tietoja käytettiin asutusalueen kustannusfunktion luomisessa. Mallinnuksen tuloksena saatiin Kyrönjoen virtaamat ja vedenpinnankorkeudet eri paalukohdille, kun lähtöarvoiksi oli asetettu tiettyjä virtaamatilanteita kuvaavia tunnettuja tai laskettuja virtaama-arvoja mallin uomien tietyille poikkileikkauksille. Tulosten avulla luotiin ArcGIS -ohjelman tulvavaarakartoitustyökalulla tulvakartat, joista näkyi veden leviäminen tarkastelualueelle eri virtaamatilanteissa. Näistä kartoista laskettiin vahinkokustannukset asutusalueella eri vedenkorkeuksille. Tutkittu asutusalue jaettiin tätä varten veden nousureittiä kuvaaviin alueisiin, joille kullekin laskettiin kustannukset alueella olevien rakennusten arvojen perusteella.

Koska optimointiongelmassa tähdätään kustannusten minimointiin, täytyy tavoitefunktion minimointituloksen olla rahayksikössä. Tavoitefunktio sisältää vahinkofunktiot pengerrysalueille ja niiden ulkopuoliselle alueelle, joka on pääasiassa asutusaluetta. Asutusalueiden vahinkofunktioon vaikuttavat alueella olevien rakennusten laatu ja arvo ja funktiossa huomioidaan veden nousukorkeuden vaikutus rakennuksille aiheutuviin vahinkoihin. Pengerrysalueiden vahinkofunktioihin vaikuttavat alueilla viljeltävien kasvilajien yksikköhinnat ja normisadot, mutta toisin kuin asutusalueilla, funktiossa ei huomioida veden nousukorkeuden vaikutusta satovahinkojen suhteeseen kokonaissadosta.

Tulvien vaikutusta satovahinkoihin käsittelevissä tutkimuksissa vedenkorkeuden ja veden peittoajan vaikutus viljeltäviin kasveihin on otettu huomioon vahinkofunktioiden luomisessa. Kyseisissä tutkimuksissa on kuitenkin tutkittu vain yhtä kasvilajia kerrallaan. (Ganji ym. 2012; Berning ym. 2000) Berningin ym. (2000) tutkimuksessa tulvavahinkofunktion luomisessa sokeriruo'olle otettiin huomioon jopa sadon tuhoutuessa säästettävät sadonkorjuukustannukset. Tässä tapauksessa pengerrysalueiden tulvavahinkofunktiot luodaan yksinkertaisemmalla tavalla ja vahinkofunktioissa huomioidaan vain tulvaveden kanssa kosketuksiin joutuvien viljelykasvien arvot. Tulvaveden alle jäävillä pengerrysalueiden pelloilla viljellään useilla vierekkäin olevilla peltopalstoilla eri kasvilajeja, joilla voi olla erilainen kestäkyky tulvaveden alla. Lisäksi eri peltoalueet voivat olla tulvan aikana eripituisen ajan veden alla. Jokaisen kasvilajin erityispiirteiden huomiointi vahinkofunktiossa tekisi ongelman käsittelystä tässä tapauksessa liian monimutkaisen. Lisäksi jo matalakin tulvavesi voi aiheuttaa pellolla yleistä haittaa esimerkiksi veden liettäessä maa-ainesta pellon pinnasta ja maan erodoituessa veden mukana pois pellolta.

7.2 Tulvaluukkujen virtaamat

Rintalan pengerrysalueelle johdetaan joesta vettä Röyskölän tulvaluukun kautta, Tieksin pengerrysalueelle Ionojan tulvaluukun kautta ja Halkosaaren pengerrysalueelle Halkosaaren pumppaamon luukun kautta. Näiden patoluukkujen sijainti Kyrönjoella on esitetty kuvassa 17. Röyskölän tulvaluukun leveys on 8 m ja Ionojan luukun 6 m. Halkosaaren pumppaamon luukun leveys on 2 m. Virtaamien optimointia varten on

tiedettävä tulvaluukkujen keskimääräiset virtaamat tietyllä aikavälillä normaalissa käyttötilanteessa. Laskennassa on käytettävä keskimääräisiä virtaamia, koska patoluukkuja käytetään avaamalla niitä vähitellen suurimpaan haluttuun korkeuteen. Esimerkiksi syksyn 2012 tulvan aikana Röyskölän ja Ionojan tulvaluukut oli avattu maksimikorkeuteen vasta seuraavana päivänä luukkujen avaamisen aloittamisesta. Veden juoksutusaika riippuu yleensä tulvan kestosta ja lopulta myös pengerrysalueiden varastotilavuudesta. Syksyn 2012 tulvan aikana Röyskölän ja Ionojan patoluukkuja pidettiin auki yli kaksi vuorokautta ja Halkosaaren pumppaamon luukku yksi vuorokausi ja kuusi tuntia (Huhtamäki 2012). Tämän tutkimuksen laskelmissa tulvaluukkujen käyttöajaksi määritellään kaksi vuorokautta.

Patojen virtaamat lasketaan Unwin kaavan ja alla esitettyjen virtaamakaavojen avulla (Mustonen 1982: 172–175). Unwin kaavalla lasketaan ensin, vaikuttaako alavesi virtaamaan. Mikäli Unwin kaavalla laskettu arvo h_{kr} on pienempi kuin alaveden korkeus eli h_2 , alavesi vaikuttaa virtaamaan. Mikäli luku on suurempi kuin alaveden korkeus, alavesi ei vaikuta virtaamaan. Unwin kaava on esitetty alla olevassa kaavassa 2. Virtaamien laskentakaavat ovat kaavat numero 3 ja 4. Virtaama lasketaan kaavalla 3, kun alavesi vaikuttaa virtaaman arvoon ja kaavalla 4, kun alavedellä ei ole vaikutusta virtaamaan.

$$h_{kr} = \sqrt{\frac{(\mu \cdot h_a)^2}{4} + 2 \cdot \frac{\mu \cdot h_a}{g} \cdot \left(\frac{Q_{arv}}{b}\right)^2} - \frac{\mu \cdot h_a}{2}, \quad (2)$$

jossa μ = purkautumiskerroin,
 h_a = patoluukun avauskorkeus [m],
 g = putouskiihtyvyys $9,81 \text{ m/s}^2$,
 Q_{arv} = arvioitu virtaama [m^3/s] ja
 b = patoluukun leveys [m].

$$Q_A = \mu \cdot h_a \cdot b \cdot \sqrt{(h_{ylä} - h_{ala}) \cdot 2 \cdot g} \quad (3)$$

$$Q_B = \mu \cdot h_a \cdot b \cdot \sqrt{h_{ylä} \cdot 2 \cdot g}, \quad (4)$$

joissa $h_{\text{ylä}}$ = yläveden korkeus [m] eli joessa olevan veden yläpinnan ero patoluukun alareunaan ja
 h_{ala} = alaveden korkeus [m] pellolla olevan veden yläpinnan ero patoluukun alareunaan.

Tulvaluukuille on tehty virtaamalaskelmia, joissa purkautumiskertoimen μ arvoksi on asetettu 0,6. Laskelmien perusteella alavedellä on vaikutusta Röyskölän padon virtaama-arvoihin, jos patoluukku on auki alle 30 cm ja alaveden korkeus on 1,40 m, eli vedenkorkeus Rintalan pengerrysalueella on $N_{43} + 37,50$ m. Kun patoluukku avataan yli 0,3 m, alaveden vaikutus häviää. Kun alaveden korkeus nousee taas hieman, sen vaikutus virtaamaan palaa takaisin. Vaikutus voidaan kuitenkin poistaa jälleen avaamalla patoluukku lisää. Myös Ionojan padon tapauksessa alavedellä on vaikutusta vain muutamassa sellaisessa tilanteessa, jossa alavesi on liian korkealla suhteessa patoluukun avauskorkeuteen.

Laskelmia yksinkertaistetaan nyt siten, että alaveden vaikutusta ei huomioida, vaikka se vaikuttaisi virtaama-arvoihin jonkin verran. Laskelmien mukaan patoluukkujen käytöllä voidaan vaikuttaa alaveden vaikutukseen. Todellisuudessa alavedellä voi olla vaikutusta patoluukkujen virtaamiin jo aiemmin kuin kaavoilla 2–4 tehdyt laskelmat osoittavat. Esimerkiksi syksyn 2012 tulvan aikana Rintalan pengerrysalueelle johdettu vesimäärä oli noin 6,1 miljoonaa kuutiota. Laskennallisesti alueelle päässeän vesimäärän olisi kuitenkin pitänyt olla paljon suurempi. Laskelmien mukaan pengerrysalueella olisi saavutettu yli 6,8 miljoonan kuution vesimäärä, kun tulvaluukku oli avattu vasta 1,60 m korkeudelle. Luukku avattiin kuitenkin tämän jälkeen vielä 1,8 m korkeuteen ja sen jälkeen suljettiin asteittain. (Huhtamäki 2012) Alaveden vaikutuksen on siis täytynyt hidastaa tulvaluukun läpi menevää virtaamaa jo kauan ennen kuin tulvaluukku oli avattu 1,8 m:iin. Tätä ei voida kuitenkaan todistaa laskelmilla, minkä takia tulvaluukkujen virtaamia kuvaavien yhtälöiden luomisessa on luotettava laskennalliseen menetelmään. Tulvaluukkujen virtaamien laskennassa käytetään siis vain kaavaa 4.

Keskimääräisiä virtaamia laskettaessa oletetaan myös, että patoluukkuja on avattu 5 cm kerrallaan ja luukkuja on pidetty jokaisella korkeudella auki yhtä kauan. Näin saadaan jokaista luukun maksimiavauskorkeutta vastaava keskimääräinen virtaama, johon myös

aiemmat avauskorkeudet vaikuttavat. Halkosaaren pengerrysalueelle vettä juoksutetaan pumppaamon luukun kautta, jonka maksimijuoksutuskapasiteetti $10 \text{ m}^3/\text{s}$ tunnetaan kirjallisuuslähteen perusteella (Rantakokko 2002: 12). Myös Halkosaaren pumppaamon luukku avataan vähitellen kuten Ionojan ja Röyskölän tulvaluukkuja. Kaikki tulvaluukut myös todellisuudessa suljetaan asteittain. (Huhtamäki 2012) Sulkemistapaa ei kuitenkaan nyt huomioida tulvaluukkujen käyttöön liittyvissä funktioissa, sillä optimoinnilla haetaan vain tavoiteltavia keskimääräisiä virtaama-arvoja tulvaluukuille.

Mikäli tulvaluukkuja päädytään käyttämään optimointilaskelmien antamien suositusten perusteella, ei luukkuja tietenkään tarvitse avata 5 cm kerrallaan. Halutun keskimääräisen virtaaman tavoittelu voidaan suorittaa myös yksinkertaisemmalla luukun avaamiskäytännöllä. Liitteellä 4 on esitetty Röyskölän, Ionojan ja Halkosaaren keskimääräiset virtaamat patoluukkujen aukaisun eri maksimikorkeuksilla 10 cm välein ja näitä virtaamia vastaavat pengerrysalueille kertyvät vesitilavuudet kaksi vuorokautta kestäväällä veden juoksutuksella. Virtaamien ja tilavuuksien välille syntyy yksinkertainen lineaarinen funktio

$$V = (2 \text{ d} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}) \cdot Q, \quad (5)$$

josta muuttujan Q kerrointa voidaan vaihtaa tutkittaessa eripituisia juoksutusjaksoja.

7.3 Kyrönjoen yläosan kaikuluotaus ja virtausmallinnus

Kyrönjoen yläosasta, eli tulvapengerrysalueiden ja Ilmajoen keskustaajaman alueelta, ei ollut aikaisemmin tehty tarkkaan korkeusmalliin ja kaikuluotaukseen perustuvaa virtausmallinnusta HEC-RAS-ohjelmalla. Kyrönjoesta oli olemassa HEC-RAS-ohjelman käyttämät HEC-2-tiedostomuodossa olevat poikkileikkaukset, mutta kyseiset tiedot olivat niin vanhoja, että tarkasteltavan jokiuoma-alueen geometrian kartoitus päätettiin suorittaa uudestaan.

7.3.1 Kyrönjoen kaikuluotaus

Huhtikuun 2013 kevättulvan aikana Kyrönjoen pohja Jalasjoen ja Kauhajoen yhtymäkohdasta Hanhikosken alapuolelle kaikuluodattiin Ympäristötekniikan insinööritoimisto Jami Ahon ja Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksen toimesta. Kaikuluotauksessa kuvatut paikat määritettiin GNSS/GPS-laitteen avulla. Karttoitus suoritettiin ajamalla moottoriveneellä haluttujen poikkileikkausten kohdalta joen rannalta toiselle kaikuluotaimen kuvatessa joen pohjaa ja GPS-laitteen tallentaessa samalla paikan koordinaatit. Veneellä pyrittiin ajamaan joen poikki noin 1 m/s nopeudella, jotta luotauspisteitä muodostuisi noin 1 m välein. Todellisuudessa pisteitä muodostui kuitenkin noin 0,5–7 m välein. Joen poikkileikkauksia kuvattiin 50–300 m välein siten, että joen mutkissa ja siltojen kohdalla poikkileikkausväliä tihennettiin ja suorilla osuuksilla pidennettiin. Kuvassa 18 on karttoituksessa käytetty GNSS/GPS-laite ja sen torni sekä kaikuluotaimen karttaplotteri. Kaikuluotain on Garmin GPSMap 421s ja sen luotaukstarkeus on noin 10 cm (Aho 2013).



Kuva 18. Vasemmalla GPS-maastotietokone, oikealla GPS-laitteen vastaanotin ja alhaalla oikealla kaikuluotaimen karttaplotteri käytössä.

7.3.2 Virtausmallinnus HEC-RAS 4.0 -ohjelmalla

Konsultti Jami Aho siirsi kaikuluotauksella saadut luotauksetiedot AutoCAD:iin, jossa jokiuoman ympärille liitettiin maanpinnan muotoja kuvaava laserkeilausaineisto tutkimusalueelta. Sen jälkeen joki ja joen ranta-alue jaettiin joen virtaussuuntaa vasten kohtisuoriin poikkileikkauksiin ja poikkileikkausten sisältämät tiedot siirrettiin HEC-RAS 4.0 -ohjelmaan HEC-2-tiedostomuodossa. Virtausmallinnusta varten joen geometriatietoihin täytyi lisätä vielä tulvapenkereet ja tutkimusvälillä olevien siltojen geometriatiedot.

HEC-RAS 4.0:lla voidaan suorittaa yksiulotteisia virtausmallinnuksia (Brunner 2010). Yksiulotteisessa virtausmallinnuksessa tarkastellaan vain poikkileikkausten suhteen kohtisuoraa virtaussuuntaa, eikä siten saada tietoa virtauksesta muissa suunnissa. Tämä voi aiheuttaa mallinnukseen epätarkkuutta etenkin uoman ulkopuolisilla tulvatasanteilla. (Keskisarja & Nikkarikoski 2006: 11) Tähän tutkimukseen yksiulotteinen virtausmallinnus oli kuitenkin riittävän tarkka, sillä veden leviämis- ja virtaustavasta tasaisessa maastossa kaukana joen rannasta ei tarvittu tietoa. Virtausmallinnus suoritettiin vakiovirtauksena. Huokunan (2013) mukaan muuttuvan virtauksen mallinnuksella saataisiin selville myös mahdolliset loop-ilmion vaikutukset joessa. Loop-ilmio tarkoittaa, että tulvan nousuvaiheessa joen vedenkorkeus tietyissä paikoissa on korkeampi kuin tulvan laskuvaiheessa, vaikka vedenkorkeudet aiheutuisivat tulvan nousu- ja laskuvaiheessa yhtä suuresta virtaamasta (Richards 1998). Vakiovirtausmallia käyttämällä voi kuitenkin päästä kohtuullisen hyvään tulokseen, mikä on tässä tilanteessa riittävää. (Huokuna 2013)

HEC-RAS-ohjelmalla vakiovirtauksena suoritettava virtausmallinnus vaatii mallinnuksen lähtötiedoiksi havaitun tai lasketun virtaama-arvon tarkasteltavan uoman ylimmälle poikkileikkaukselle, vedenpinnankorkeuden alimmalle poikkileikkaukselle sekä ainakin yhden virtaama-arvon joen jokaisen sivu-uoman ylimmälle poikkileikkaukselle. Virtaama-arvoja on kuitenkin syytä asettaa jokaiselle sellaiselle poikkileikkaukselle, jossa virtaama muuttuu esimerkiksi sivu-uomien laskupaikan takia. Virtausmallinnuksen suorittaminen vaatii myös reunaehtojes asettamisen. Kun tarkastellaan verkasvirtausta – kuten tässä tutkimustapauksessa – tarvitaan vain alavirran reunaehtoja, eli alimpien poikkileikkausten virtaamia sekä sivu-uomien virtaama-arvoja. (Brunner 2010) Mallinnuksen lähtötietoina käytettiin useita joen virtaamamittauspisteiden tietoja. Osa virtaamista katsottiin tiettyjen poikkileikkausten toistuvuuskuvaajista tai laskettiin pintavaluntatietojen ja valuma-alueiden tulona. Myös Munakan alapuolelle laskevan Seinäjoen oikaisu-uoman virtaama otettiin huomioon mallinnuksessa. Virtausmallinnus rajattiin paalujen 1271+33 ja 160 välille, eli yläjuoksulta katsottuna Jalasjoen ja Kauhajoen yhtymäkohdasta Kurikasta alajuoksulle Mustasaaren kunnan alueella olevan Skatilan sillan kohdalle.

Ennen varsinaista virtausmallinnuksen suorittamista täytyi jokiuoman Manningin kertoimet kalibroida tulvatilanteissa havaintoina saatujen vedenpinnankorkeusarvojen avulla. Kalibroinnissa Manningin kertoimia muutetaan kunnes niiden avulla lasketut vedenpinnankorkeudet vastaavat havaittuja vedenpinnankorkeuksia. (Brunner 2010) Virtausmallin kalibroinnin suoritti konsultti Jami Aho. Kalibroinnissa käytetyt havaintotiedot otettiin syksyn 2012 ja kevään 2013 tulvien aikaisista virtaama- ja vedenkorkeustiedoista. Sivu-uomien kalibroinnissa käytettiin kevään 2010 virtaama-arvoja. Kalibrointiin käytettiin Jalasjoen ja Kauhajoen säännöstelypatojen sekä Pitkämön tekojärven virtaamatietoja päivältä 8.10.2012. Jalasjoen säännöstelypadon mahdollisesti liian pienet virtaamamittaukset aiheuttivat ongelmia virtausmallin kalibroinnissa. Kyseiset virheelliset virtaama-arvot kalibroinnissa vaikuttivat virtausmalliin kasvattamalla Manningin karkeuskertoimia ja nostamalla mallinnettua vedenpinnankorkeuksia arvioituja suuremmiksi. Korkeimmillaan pääuoman alueella Manningin karkeuskertoimen arvo oli 0,06. Virtausmallinnuksen tulosten avulla tehdyt tulvakartat antoivat kuitenkin melko realistisen kuvan veden nousutavasta tarkastelualueella, mikä oli tämän tutkimuksen kannalta tärkeintä.

Myöhemmin virtausmallissa käytetyt virtaamatiedot arvioitiin uudestaan Kyrönjoen pääuomalle Hanhikosken virtaamatietojen avulla ja virtausmalli kalibroitiin korjattujen virtaama-arvojen avulla. Uuden virtausmallin tulokset poikkesivat edellisistä siten, että esimerkiksi Nikkolan sillan kohdalla vedenkorkeus HW 1/20 oli uudessa virtausmallissa 37 cm alempi kuin aiemmassa mallissa. Tässä työssä on kuitenkin käytetty vain aiemman virtausmallinnuksen tuloksia, sillä uusi virtausmalli valmistui työn ollessa jo lähes valmis. Virtausmallien vedenkorkeuksien ero on koko edellä mainitulla jokiosuudella sellainen, että aiemman virtausmallin käyttäminen rakennusvahinkojen laskennassa antaa Ilmajoen ja Kurikan kuntien alueella hieman korkeampia kustannusarvoja kuin todellisuudessa pitäisi. Seinänsuun pumppaamolta joen alajuoksulle uuden virtausmallin antamat vedenkorkeudet ovat taas pääasiassa korkeampia kuin aiemman virtausmallin vedenkorkeudet. Suurimmillaan uuden virtausmallin vedenkorkeus on 68 cm korkeampi kuin aiemman virtausmallin antama korkeus joen paalulla 208+00 lähellä Skatilan siltaa.

7.4 Tavoitefunktio

Tavoitefunktion on tässä tapauksessa kuvattava tulvavahinkokustannusten suuruutta, joka riippuu joen virtaaman jakautumisesta eri kohteiden kesken. Tavoitefunktion globaali minimikohta kuvaa pienimpiä mahdollisia kustannuksia, jotka virtaaman jakaantuminen optimaalisella tavalla voi tutkimusalueella aiheuttaa. Tavoitefunktioon on sisällytettävä vahinkofunktiot, joista kolme kuvaa tulvapengerrysalueille päästettävää virtaamaa ja yksi jokeen jäävää asutusalueisiin vaikuttavaa tulvavirtaamaa. Tavoitefunktio, joka on esitetty yhtälössä 20, on tulvavahinkofunktioiden summa.

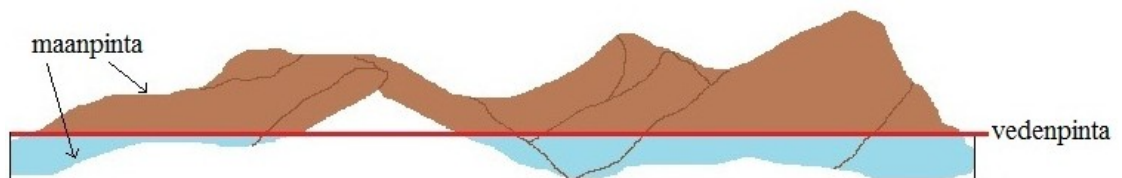
Tulvavirtaaman jakaminen tietyllä tavalla pengerrysalueiden ja asutusalueen kesken aiheuttaa tietyn suuruiset vahinkokustannukset. Tulvavahinkofunktioita luotaessa on pengerrysalueiden tapauksessa tutkittava aluksi vedenpinnankorkeuden suhdetta veden peittämään pinta-alaan ja eri korkeusväleillä syntyviin satovahinkokustannuksiin. Seuraavaksi on tarkasteltava vedenpinnankorkeuden ja vesitilavuuden välistä suhdetta, jotta saadaan tietää kustannusten syntymisen riippuvuus alueilla olevasta vesimäärästä. Asutusalueen funktion tapauksessa veden tilavuutta ei tarvitse huomioida, sillä siinä veden nousukorkeus ja veden nousun seurauksena syntyvät kustannukset sidotaan suoraan purkautumiskäyrien avulla joen virtaamaan. Asutusalueella vahinkofunktion on otettava huomioon myös veden nousukorkeuden suhteellinen vaikutus vahinkokustannuksiin.

7.4.1 Pengerrysalueiden tulvavahinkofunktiot

Tulvavahinkofunktioita varten on tutkittava pengerrysalueilla viljeltäviä kasvilajeja ja niiden pinta-aloja. Tätä varten ArcGIS-ohjelmaan tuotiin layer -tiedostona peltolohkorekisteri, joka näyttää tutkimusalueen peltolohkojen sijainnin ja koon sekä lohkoilla viljeltävät kasvit ja niiden viljelyalat. Pengerrysalueita edustavat korkeusmallitiedostot jaettiin käyttämällä ArcGIS-ohjelman Reclassify-, Raster to Polygon- ja Split Layer By Attributes- työkaluja korkeusvyöhykkeisiin Liitteen 2 taulukoissa esitetyn korkeusjaon ja ohjelman työkalujen avulla tutkittiin, kuinka suurilla pinta-aloilla mitäkin kasvilajia viljellään eri korkeusvyöhykkeillä. Intersect-työkalulla leikattiin peltolohkorekisteritiedoston ja eri korkeusvälitiedostojen yhteiset alueet omiksi tiedostoikseen, joiden attribuuttitaulukoista saatiin kunkin korkeusvälin alueella

viljeltävien kasvilajien nimet ja viljelyalat. Alueilla viljeltävien kasvilajien normisadot Etelä-Pohjanmaalla ja yksikköhinnat vuonna 2012 on esitetty Liitteen 1 taulukossa. Näiden tietojen avulla laskettiin Excelissä korkeusvyöhykkeiden arvot ja veden nousutapaa kuvaava kumulatiivinen tulvakustannusten nousu.

ArcGIS:n avulla selvitettiin myös korkeusvyöhykkeiden kokonaispinta-alat (sisältäen myös peltolohkojen ulkopuoliset pinta-alat) ja niitä vastaavat vesitilavuudet. Tilavuudet ja pinta-alat laskettiin ArcGIS:n 3D-analystin Surface Volume -työkalulla. Ennen tilavuuksien laskemista korkeusvälitiedostoja yhdisteltiin siten, että toisen korkeusvälin tiedostoon yhdistettiin Merge-työkalulla ensimmäisen korkeusvälin tiedosto, tällä tavalla saatuun tiedostoon yhdistettiin kolmannen korkeusvälin tiedosto ja sama toistettiin viimeiseen korkeusväliin asti. Siten Surface Volume -työkalua käyttämällä voitiin asettaa saaduille kumulatiivisesti kasvaville korkeusvälitiedostoille uloimman korkeusvälin korkein kohta pinnaksi, jonka alapuolelta työkalu laskee tilavuuden. Kuvassa 19 on esitetty Surface Volume -työkalun toimintaperiaate. Kuvassa punainen vaakaviiva kuvaa tasoa, jonka alapuolisen tilavuuden työkalu laskee käyttäen alapintana korkeusmallin määräämää tasoa (maanpinta). Korkeusvyöhyke-, pinta-ala- ja vesitilavuustiedot eri pengerrysalueille on esitetty Liitteen 2 taulukoissa.



Kuva 19. Surface Volume -työkalun toimintaperiaate mukaillen Esri:ä (2011).

Luotaessa vesitilavuuden ja maan arvon välistä funktiota, jätettiin datasta pois arvot, jotka ylittivät kullekin pengerrysalueelle määritellyt hyötytilavuudet. Pengerrysalueiden vesitilavuuksien ja maan arvojen välille yritettiin ensin sovittaa polynomi- ja eksponenttifunktioita. Kuitenkin molemmissa tapauksissa residuaalit jäivät liian isoiksi. Isompiasteiset polynomifunktiot alkoivat myös oskilloida liikaa datapistejoukon alku- ja loppupäässä. Tämän takia funktioiden sovitukseen käytettiin Matlabin spline-algoritmia, joka perustuu nimensä mukaisesti kuutiollisten spline-käyrien interpolointimenetelmään (cubic spline interpolation). Kuutiollisten splinien interpolaatio muodostaa paloittain jatkuvan jokaisen datapisteen kautta kulkevan käyrän. Kuutiollinen spline on

kolmannen asteen polynomikäyrä, joka kulkee yhden datapisteparin välillä. (University of Utah 2002)

Tavoitefunktion yksiköksi on tultava €, joten pengerrysalueiden vahinkofunktioiden on kuvattava alueille kolmen vuorokauden aikana tulevan keskimääräisen virtaaman ja veden nousun ja leviämisen seurauksena syntyvien satovahinkokustannusten välistä riippuvuutta. Tutkimusten mukaan veden syvyys ja aika, jonka satokasvit ovat veden alla, vaikuttavat sadon vahingoittumisen asteeseen (Kaitera 1941; Berning ym. 2000). Näitä tekijöitä ei kuitenkaan nyt huomioida vahinkofunktioissa. Sen sijaan oletetaan, että veden viipymäaika pengerrysalueilla on riittävän pitkä tuhoamaan veden alle jääneen sadon kokonaan ja myös reilusti alle 0,5 m vedenkorkeuden alueella ollut sato tuhoutuu täysin. Seuraavan esimerkin mukaisesti Matlabin spline-algoritmillä sovitetusta funktiosta haettiin interp1-algoritmillä ne kustannukset, jotka vastasivat kahden vuorokauden kestäville keskimääräisillä virtaamilla pengerrysalueille kertyviä vesitilavuuksia (Liite 4).

```
% Vesitilavuudet [m^3] eri korkeusväleillä:
VRintala = [0, 77135.82, 176012.13, 405215.13131,..., 43157866.55150];

% Korkeusvälien arvot [€]:
ERintala = [0, 1221.67, 4958.42, 66389.39123,..., 1668944.00344];

% Kahden vuorokauden virtaaman aiheuttama vesitilavuus [m^3]
pengerrysalueella:

UusTil = [0, 352393.907, 528590.860, 704787.814,..., 7224075.093];

% Hakee yllä olevia virtaamia vastaavat kustannukset spline-
algoritmillä luodulta käyrältä.

yi = interp1(VRintala,ERintala,UusTil,'spline');
```

Haetuista kustannuksista tehtiin jokaiselle pengerrysalueelle tulvaluukkujen keskimääräisiä virtaama-arvoja esittävien vektoreiden kanssa samanpituiset vektorit. Seuraavaksi spline-algoritmillä tehtiin käyrän sovitukset myös keskimääräisten virtaamien ja kustannusten välisille datapisteille. Kyseisiä sovituksia käytettiin optimoinnissa liitteellä 7 olevan Matlab-koodin mukaisesti. Optimointilaskelmat tehtiin myös

sellaisilla pengerrysalueiden kustannusvektoreilla, jotka oli kerrottu 0,50:llä. Tarvittaessa kyseistä kerrointa voidaan muuttaa sen mukaan, kuinka suuri osa pengerrysalueiden sadosta on korjattu. Sekä vesitilavuuksien ja kustannusten että keskimääräisten virtaamien ja kustannusten väliset spline-algoritmillä luotujen käyräsovitusten kuvaajat on esitetty liitteellä 3.

7.4.2 Asutusalueiden tulvavahinkofunktio

Kyrönjoen kaikuluotaustietojen avulla konsultti Jami Aho teki HEC-RAS:lla 8 kappaletta erilaisia virtausmalleja virtaamatilanteesta MHQ virtaamaan HQ 1/1000, jotta saatiin riittävästi aineistoa tulvavahinkofunktion luomiseksi. Lisäksi hän teki virtausmallit syksyn 2012 tulvatilanteelle sekä kevään 2013 tulvapäiville 18.4., 20.4., 21.4., 23.4. ja 26.4.. Täydensin virtausmallinnuksia tekemällä ne myös tulvatoistuvuuksille HQ 1/30, 1/40, 1/60 ja 1/80. HEC-RAS:ssa virtausmallinnusten lähtötiedoiksi kirjoitettiin virtaama-arvot Kyrönjoen pääuoman ja sivu-uomien muutamille poikkileikkauksille eri virtaamatilanteille. Lisäksi HEC-RAS:ssa asetettiin jokaiselle uomalle reunaehdot vähintään uomien alimmille poikkileikkauksille. Mallinnusten tuloksena saatiin eri virtaamatilanteiden virtaama- ja vedenkorkeusarvot Kyrönjoen poikkileikkauksille.

HEC-RAS -virtausmallinnuksen tuloksena saadut vedenkorkeustiedostot siirrettiin ArcGIS 9.3 -ohjelmaan HEC-GeoRAS -laajennusohjelman avulla. Mallinnusten tuloksena saatujen vedenkorkeusarvojen perusteella luotiin ArcGIS:ssä käytettävällä ympäristöhallinnon tulvavaaratyökalulla jokaista virtaamatilannetta vastaava tulvakartta. Tulvakarttoja ja veden nousua eri rakennusten kohdalla tarkasteltiin esitystavalla, jossa tulva-alueen vedenkorkeudet on esitetty kartoissa korkeusväleille 0–0,5 m, 0,5–1 m, 1–2 m ja 2–3 m. Tulvakarttojen yhdistelmä, jossa eri virtaamatilanteita vastaavat vesialueet on esitetty eri väreillä, on liitteen 6 kartalla. Kartasta voidaan huomata, että jokainen virtaamatilanne aiheuttaa veden leviämisen tietyn suuruiselle joen virtaussuunnan myötäiselle maakaistaleelle, jolta kastuvien rakennusten määrä kyseisellä vedenkorkeudella voidaan laskea.

Seuraavaksi tutkittiin virtausmallinnusten avulla saadun korkeusjaon perusteella määräytyneiden maakaistaleiden arvoja mahdollisten tulvakustannusten arvioimiseksi.

Jokaisen maa-alueen arvo μ_i määräytyy sillä olevien rakennusten kokonaisarvon perusteella yksikössä euroa [€]. Eri korkeusväleillä olevien rakennusten määrä ja käyttötarkoitus laskettiin ArcGIS:ssä avatusta rakennus- ja huoneistorekisterin (RHR) tiedostosta, jossa kartalle otettiin näkyviin kaikki – myös lupavaiheessa olevat – 1.1.1800 jälkeen ja 31.5.2013 mennessä rakennetut ja suunnitellut rakennukset Ilmajoen ja Seinäjoen kuntien alueella. Tarkastelu kohdistettiin joen rannan välittömässä läheisyydessä oleviin rakennuksiin sekä muihin tulvaveden kanssa todennäköisimmin kosketuksiin joutuviin rakennuksiin. ArcGIS:llä luoduissa tulvavaarakartoissa (Liite 6) näkyy veden leviäminen myös pengerrysalueille, mutta se johtuu vain poikkileikkausviivojen ulottumisesta pengerrysalueille asti. Poikkileikkausviivat eivät anna pengerrysalueille vedenkorkeutta 0 m, vaikka virtausmallinnusten mukaan niille ei johdeta vettä, sillä virtausmallinnus on määrännyt jokaiselle poikkileikkausviivalle tietyn vakavesikorkeuden. Pengerrysalueiden kautta näennäisesti leviävää tulvavettä ei siksi huomioitu rakennusvahinkokustannusten laskennassa. Vahinkokustannus-tarkasteluun laskettiin kuitenkin mukaan rakennukset, jotka olivat lähellä mahdollisesti tulvivia oja ja sivu-uomia. Kyrönjokeen laskee useita pienempiä uomia ja oja, jotka tulvivat joen vedenpinnan ollessa riittävän korkealla.

Eri tulvatilanteissa veden alle jäävien rakennusten laskemisessa käytettiin apuna myös maanmittauslaitoksen maastotietokantaa, joka näyttää rakennusten sijainnin, muodon ja koon rakennus- ja huoneistorekisterin tiedostoa tarkemmin. Maastotietokannan rakennuspolygoneista nähtiin siten tarkemmin, milloin tulvavesi saavuttaa tietyn rakennuksen seinän. Rakennus- ja huoneistorekisterin tiedoista saatiin kunkin rakennuksen käyttötarkoitus, rakennusvuosi ja pinta-ala. Rakennus- ja huoneistorekisterin rakennusten perustiedot on kerätty vuonna 1980 ja sen jälkeen tietoja uusista rakennuksista ja muista muutoksista on päivitetty kuntien rakennusvalvontaviranomaisten avulla. Rekisterissä ei ole tietoa kellareista tai rakennusten korkeuksista. (Ämmälä 2008: 9)

Suurin osa tyhjistä rakennuksista poistettiin tarkastelusta arvottomina. Tulvaveden nousua kuvaavien maakaistaleiden perusteella laskettiin kunkin maakaistaleen alueella olevat rakennukset ja merkittiin niiden pinta-alat, iät ja rakennustyytit Excel - taulukkoon. Seuraavaksi määritettiin rakennuksille rakennuskohtaiset vahinkofunktiot,

joissa otettiin huomioon myös veden nousun suhteellinen vaikutus kustannuksiin taulukon 10 mukaisesti.

Rakennusvahinkofunktioiden pohjana käytettiin toisen asteen funktiota

$$f(h) = ah^2 + bh + c, \quad (6)$$

jossa h = vedenkorkeus ja
 a , b ja c ovat rakennuskohtaisia rakennuksen arvosta riippuvia
parametreja,

koska Silanderin ja Parjanteen (2012: 14) mukaan se huomioi paremmin alapohjan vahingot pienillä vesisyvyyksillä yksikerroksisille rakennuksille ja toimii hyvin vesisyvyyden ollessa alle 3 m.

Funktion nollakohta on rakennuksen ensimmäisen kerroksen lattiapinnan korkeus ja sen muoto perustuu USACE:n (1996) tutkimuksiin (ks. Silander & Parjanne 2012: 14). Tässä tutkimuksessa vahinkofunktioissa ei huomioitu rakennusten kellareita, sillä RHR-tiedosto ei sisällä tietoa talojen kellareista. Tiedon puuttuminen vääristää hieman arvioituja rakennusvahinkokustannuksia. Tarkastelualueella olevien rakennusten kellarit ovat kuitenkin yleensä hyvin suojattuja tulvilta ja niihin johtavat viemärit voidaan usein tukkia tulvaveden noustessa haitalliselle tasolle. Kellarillisille rakennuksille vahinkokustannusten prosentuaalinen nousu alkaa aikaisemmin kuin kellarittomille rakennuksille. (USACE 2003) Michelssonin ja Saaren (2009) arvioiden mukaan 1- tai 2-kerroksisten omakotitalojen kellareiden tulvavahinkokustannukset ovat noin 500–580 €/m² ja 4-kerroksisten kerrostalojen kellareiden noin 680 €/m².

Yksikerroksisen kellarittoman rakennuksen ja sen irtaimiston vahinkojen prosentuaalinen osuus rakennuksen ja irtaimiston arvosta vesisyvyyden suhteen on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Yksikerroksisen, kellarittoman omakotitalon vahinkokustannusprosentti rakennuksen ja irtaimiston kokonaisarvoista vedenkorkeuden suhteen (USACE 2003: 12, 15).

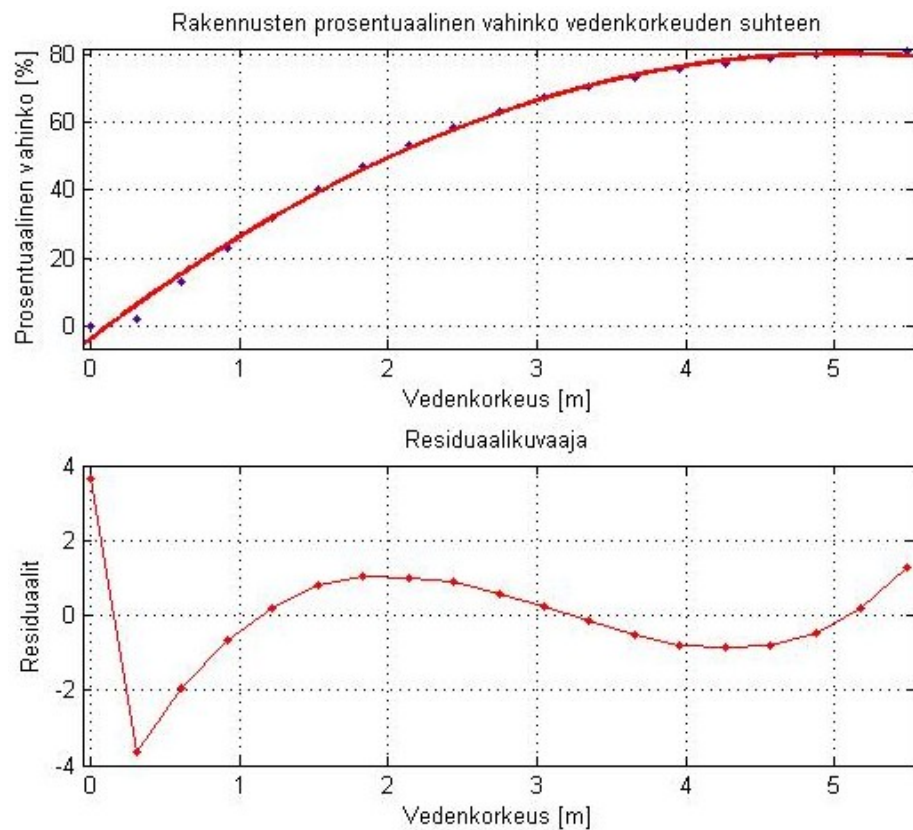
Vedenkorkeus [m]	% Rakennuskustannus	% Irtaimistokustannus
0	0	0
0,3048	2,5	2,4
0,6096	13,4	8,1
0,9144	23,3	13,3
1,2192	32,1	17,9
1,524	40,1	22
1,8288	47,1	25,7
2,1336	53,2	28,8
2,4384	58,6	31,5
2,7432	63,2	33,8
3,048	67,2	35,7
3,3528	70,5	37,2
3,6576	73,2	38,4
3,9624	75,4	39,2
4,2672	77,2	39,7
4,572	78,5	40
4,8768	79,5	40
5,1816	80,2	40
5,4864	80,7	40

Kaavan 6 toisen asteen funktio sovitettiin Excelissä USACE:n (2003) taulukossa 10 esitettyihin tutkimustuloksiin yksikerroksisten talojen vahinkokustannusten suhteellisesta noususta vedenkorkeuden suhteen sekä rakennuksille että irtaimistolle. Taulukon 10 arvoja on nyt muutettu siten, että vedenkorkeuden nollakohta on asetettu kustannusten nolla-arvon kanssa samaan kohtaan, kun alkuperäisessä lähteessä se oli rakennuksen lattiapinnan tasolla ja maantasoa kuvasi arvo -0,6096 m. Sovituksen tuloksena saaduilla funktioilla 7 (rakennusvahingot) ja 8 (irtaimistovahingot) laskettiin jokaiselle rakennukselle erikseen eri vedennousukorkeuksilla syntyvät kustannukset.

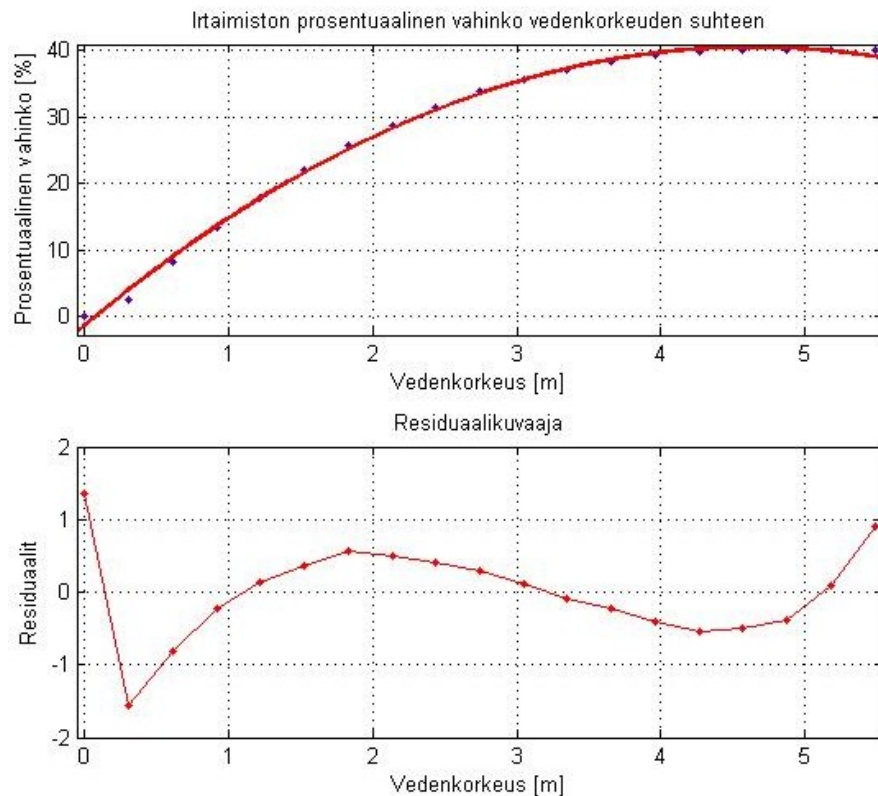
$$f(h) = -3,2903h^2 + 33,19h - 3,6474 \quad (7)$$

$$f(h) = -1,9474h^2 + 18,059h - 1,3671 \quad (8)$$

Samalla laskentaperiaatteella tutkittiin myös muiden kuin asuinrakennusten vahinkokustannuksia. Kuvassa 20 on esitetty yksikerroksisen kellarittoman omakotitalon suhteellisen rakennusvahinkodatan funktiosovitus ja sen residuaalikuvaaja. Kuvassa 21 on esitetty vastaavat kuvaaja omakotitalon irtaimistolle. Kuvaajat on tehty Matlabin Curve Fitting Tool -työkalulla.



Kuva 20. Yksikerroksisen kellarittoman omakotitalon suhteellisiin vahinkokustannuksiin sovitettu toisen asteen polynomi ja sen residuaalikuvaaja.



Kuva 21. Yksikerroksisen kellarittoman omakotitalon irtaimiston suhteellisiin vahinkokustannuksiin sovitettu toisen asteen polynomi ja sen residuaalikuvaaja.

Varsinaisena vahinkofunktiona rakennuksille käytettiin kaavassa 9 esitettyä funktiota, joka antaa arvion rakennevahinkojen kustannuksista. Yhtälössä neliöhinta tarkoittaa rakennuksen uudisneliöhintaa. Eri rakennusten ja rakennelmien arvojen määrittämisessä käytettiin apuna Finanssialan keskusliiton (2012: 7–13) määrittämiä neliöhintoja eri rakennustyypeille. Joillekin rakennuksille ei löytynyt suoraa neliöhintaa, vaan hinta jouduttiin arvioimaan vastaavankaltaisten rakennusten neliöhintojen perusteella. Neliöhintoina käytettiin keskimääräisiä nettoneliöhintoja, sillä RHR:n tiedoissa rakennusten neliömäärät on ilmoitettu huoneistopinta-aloina. Tämän työn laskelmissa käytetyt neliöhinnat on esitetty liitteen 5 taulukossa. Huoneistopinta-ala tarkoittaa suunnilleen samaa kuin FK:n käyttämä termi nettoala, mutta siinä huomioidaan myös väliseinien pinta-alat (KTI 2001). Rakennuksen bruttoalaan luetaan nettoalan lisäksi muun muassa ulko- ja sisäseinien vaakasuorat pinta-alat. Nettoneliöhinnat ovat hieman suurempia kuin bruttoneliöhinnat. (FK 2012: 5). Viljankuivaamojen, saunojen, piha- ja talousrakennusten sekä vapaa-ajan rakennusten pinta-alat jouduttiin arvioimaan ArcGIS:n pinta-alalaskurin avulla. Saunojen, kesämökkien ja urheiluhallien

neliöhinnoiksi valittiin FK:n määrittämien netto- ja bruttoneliöhintojen keskiarvot. Erilaisille viljankuivaamoille ja viljan säilytysrakennuksille Finanssialan keskusliitto on määrittänyt kuutiohinnot. Tässä laskelmassa kyseisten rakennusten kuutiohinnoiksi arvioitiin 270 €/m³. Rakennuksen nykyhinta voi poiketa suurestikin uudishinnasta, joten kaavaan 9 lisättiin vielä rakennuksen ikää kuvaava kerroin. Esimerkiksi 10 vuotta vanhan asuinrakennuksen arvo on 90 % uudishinnasta (FK 2012: 15).

$$\text{Rakennusvahinko(€)} = f(h)/100 \cdot \text{rakennuksen kerrosala (m}^2\text{)} \cdot \text{neliöhinta (€/m}^2\text{)} \quad (9)$$

Rakennusvahinkokustannuksiin ei tule automaattisesti mukaan irtaimistovahinkojen kustannuksia, joten ne on arvioitava erikseen. Nyt jokaiselle omakotitalolle, rivitalolle ja vapaa-ajan asunnolle arvioitiin kiinteät irtaimistokustannukset, siten että omakotitalolle ja rivitalolle irtaimiston lähtöarvoksi asetettiin 10 000 € ja vapaa-ajan asunnoille 2000 €. Kouluille, päiväkodeille ja museoille irtaimiston lähtöarvoksi arvioitiin 20 000 €. Rakennusten vahinkofunktioiden avulla laskettiin erikseen jokaisen rakennuksen rakenne- ja irtaimistovahinkokustannusten nousut veden eri nousukorkeuksilla ja lopulta jokaisella vedenkorkeusvyöhykkeellä syntyvät kustannukset laskettiin yhteen. Eri vedenkorkeuksilla syntyvät rakennevahinkokustannukset laskettiin 173 rakennukselle ja irtaimistovahinkojen kustannukset 83 rakennukselle. Näin saatiin asutusalueelle yhtenäinen tulvakustannusfunktio.

Edellä mainittujen maakaistaleiden arvot ja vedenpinnan asteittaisen nousun aiheuttamat kumulatiiviset kustannukset on esitetty taulukossa 11. Kustannustarkastelu ulottuu Koskenkorvan padolta Kyrönjoen alajuoksulle Skatilaan. Suurin osa liitteen 6 karttakuvan tulva-alueilla, tai ainakin alemmilla vedenkorkeusväleillä, veden alle jäävistä rakennuksista on huomioitu kustannustarkastelussa. Kaikkien rakennusten vahinkokustannuksia ei voitu laskea RHR:stä puuttuvien tietojen takia, mutta kyseiset rakennukset olivat todennäköisesti pääasiassa vanhoja piharakennuksia tai latoja. Osa epäselvistä rakennuksista tarkastettiin haastatteleamalla asukkaita paikanpäällä tai puhelimitse. Kuvassa 24 on esitetty asutusalueen tulvavahinkofunktion kuvaaja. Tässä tarkastelussa vedenpinnan nousua ja tulvaveden leviämistä asutusalueella on tarkasteltu sellaiseen tulvatilanteeseen asti, jossa vesi yltää Nikkolan sillan kohdalla korkeudelle

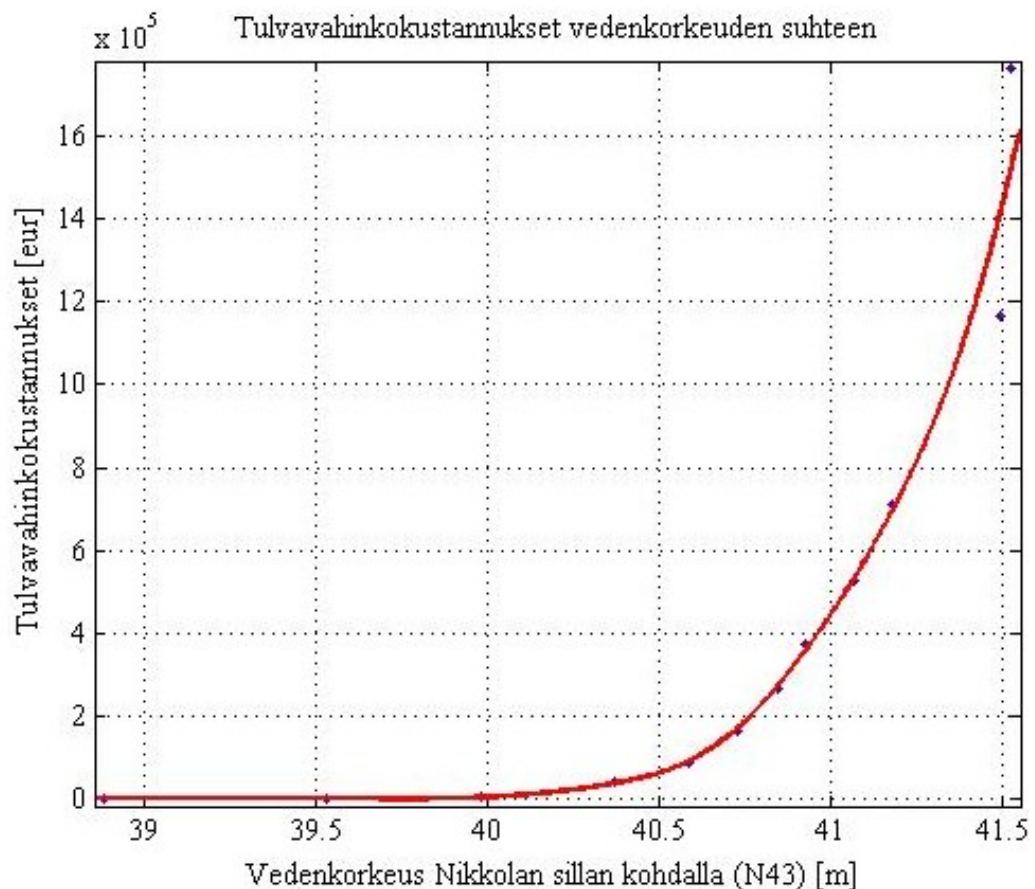
$N_{43} +41,53$ m (uudemman virtausmallinnuksen mukaan korkeudelle $N_{43} +41,16$ m). Kyseistä vedenkorkeutta ei kuitenkaan valita Kyrönjoen vedenkorkeuden ylärajaksi optimointilaskelmissa.

Taulukko 11. Kyrönjoen virtaaman nousun aiheuttamat rakennus- ja irtaimistovahinkokustannukset asutusalueilla Kyrönjoen rannoilla välillä Skatila – Koskenkorvan silta.

Korkeus- väli	Joen virtaama (Nikkolan silta) [m ³ /s]	Joen vedenkorkeus N_{43} -järjestelmässä (Nikkolan silta) [m]	Tulvavahinkokustannusten arvioitu nousu [€]
1	168	38,88	0
2	205	39,53	0
3	233	39,98	1 222
4	261	40,37	40 971
5	277	40,59	86 092
6	288	40,73	163 220
7	296	40,85	265 533
8	303	40,93	370 332
9	314	41,07	524 969
10	323	41,18	709 676
11	358	41,50	1 167 296
12	411	41,53	1 766 160

Nykyisen tulvasuojelukäytännön mukaan pengerrysalueille voidaan alkaa johtamaan vettä, kun Kyrönjoen virtaama ylittää tilastolliselta toistuvuudeltaan ylivirtaamaa HQ 1/20 vastaavan vedenkorkeuden Nikkolan sillan kohdalla, eli tason $N_{43} +40,00$ m. Optimointiongelman avulla tutkitaan kyseistä tilannetta suurempia Kyrönjoen virtaamatilanteita, sillä halutaan selvittää, voidaanko veden johtamista pengerrysalueille viivästyttää suhteessa nykyiseen käytäntöön. Siten optimoinnissa käytettävistä Nikkolan sillan virtaama-arvoista on vähennetty Nikkolan sillan vedenkorkeutta $N_{43} +40,00$ m vastaava virtaama $\sim 234,75$ m³/s, jolloin vedenkorkeudelle $N_{43} +40,00$ m on saatu virtaama-arvoksi 0 m³/s.

Kuvan 22 kuvaajassa on esitetty Matlabin Curve fitting tool -työkalun Smoothing spline -sovituksella luotu käyrä asutusalueen vedenkorkeuden (Nikkolan sillan kohdalla) ja arvioitujen tulvavahinkokustannusten välille. Tulvakustannuksia alkaa syntyä asutusalueella joen virtaaman ollessa Nikkolan sillan kohdalla (paalu 1052+25) noin $232 \text{ m}^3/\text{s}$ ja vedenkorkeuden $N_{43} + 39,96 \text{ m}$. Kyseiset arvot on haettu Matlabin spline ja fnval -algoritmien avulla tutkituista vahinkokustannus-, vedenkorkeus- ja virtaamatiedoista.



Kuva 22. Asutusalueen tulvavahinkokustannukset Nikkolan sillan vedenpinnan-korkeuden suhteen.

7.5 Rajoiteyhtälöt

Tässä optimointiongelmassa rajoiteyhtälöiden avulla asetetaan ylä- ja alarajat pengerrysalueiden tulvaluukkujen virtaamille ja Kyrönjoen virtaamalle Nikkolan sillan kohdalla. Pengerrysalueilla virtaamien ylärajoihin vaikuttavat tulvaluukkujen maksimivirtauskapasiteetit. Nikkolan sillan kohdalla Kyrönjoen virtaaman ylärajaksi

asetetaan virtaama, jolla vesi ei vielä pääse virtaamaan joesta penkereiden yli pengerrysalueille kuin korkeintaan tulvakynnysten kohdalla.

Tässä optimointiongelmassa Kyrönjoen vedenpinnankorkeuden ylärajaksi asetetaan Nikkolan sillan kohdalla $N_{43} +40,40$ m, jolloin joen virtaama vastaavalla paikalla on noin $263 \text{ m}^3/\text{s}$. Kyseinen vedenkorkeuden yläraja on määritetty ArcGIS:llä tehtyjen tulvakarttojen avulla. Myös uuden, korjatun virtausmallinnuksen tulosten pohjalta luotuja tulvakarttoja tarkastelemalla päädyttiin vedenkorkeuden ylärajaan $N_{43} +40,40$ m Nikkolan sillan kohdalla. Kun vedenkorkeus ylittää Nikkolan sillan kohdalla korkeuden $N_{43} +39,98$ m (korjatun virtausmallinnuksen mukaan), voi vesi tulvakarttojen perusteella virrata joesta penkereiden yli muutamissa matalissa kohdissa kuvan 23 mukaisesti. Tällaiset vedenylityskohdat voidaan havaita virtausmallinnusten avulla tehdyistä tulvakartoista, mikäli penkereiden matalia kohtia halutaan korottaa. Kuvan 23 kartat on tehty korjatun virtausmallinnuksen vedenkorkeustietojen pohjalta.



Kuva 23. Tulvavesi ylittää penkereen paikallisesti Malkakosken tulvakynnyksellä (vasemmanpuoleinen kuva) sekä Tieksin ja Rintalan tulvakynnyksillä (oikeanpuoleinen kuva), kun vedenkorkeus Nikkolan sillan kohdalla on $N_{43} +39,98$ m (Pohjakartta: Maanmittauslaitos lupa nro 7/MML/12).

Kyrönjoen virtaaman alarajaksi optimointilaskelmassa asetetaan Nikkolan sillan paalukohdan vedenkorkeutta $N_{43} +40,00$ m vastaava virtaama. Kohdat, joissa vesi voi virtausmallinnusten tulosten mukaan ylittää tulvapenkereet Nikkolan sillan vedenkorkeuden ollessa $N_{43} +40,00$ m, ovat pääasiassa tulvapenkereisiin tehtyjä tulvakynnyksiä. Taulukossa 12 on esitetty Tieksin, Rintalan ja Halkosaaren pengerrysalueiden tulvakynnysten sijainnit, harjakorkeudet ja tässä työssä käytetyn virtausmallinnuksen tuloksena saadut vedenkorkeudet joessa kyseisillä paikoilla. Nämä

vedenkorkeudet vastaavat tilannetta, jossa Nikkolan sillan kohdalla vedenkorkeus on $N_{43} +40,37$ m. Oikeanpuoleisessa sarakkeessa on esitetty korjatun virtausmallinnuksen vedenkorkeudet. Ne vastaavat tilannetta, jossa vedenkorkeus Nikkolan sillan kohdalla on korjatun mallinnuksen mukaan $N_{43} +40,34$ m. Taulukossa on esitetty myös joen vedenkorkeuksien (korjatun virtausmallinnuksen mukaan) ja tulvakynnysten harjakorkeuksien erotukset. Arvoista voidaan huomata, että vedenkorkeuden ollessa Nikkolan sillan kohdalla $N_{43} +40,34$ m (tai $N_{43} +40,37$ m) pitäisi veden virrata joesta tulvakynnysten yli tulvapengerrysalueille. Tämän tarkastelun perusteella vesi voi siis virrata tulvakynnysten yli myös, kun Nikkolan sillan kohdalla vedenkorkeus saavuttaa tason $N_{43} +40,40$ m.

Taulukko 12. Rintalan, Tieksin ja Halkosaaren penkereiden tulvakynnysten harjakorkeudet ja joen vedenkorkeus, kun Nikkolan sillan kohdalla vedenkorkeus on $N_{43} +40,37$ m. Oikeanpuoleisessa sarakkeessa ovat joen vedenkorkeudet korjatun virtausmallinnuksen mukaan, kun vedenkorkeus Nikkolan sillalla on $N_{43} +40,34$ m sekä joen vedenkorkeuden ja tulvakynnysten harjakorkeuden erotus.

Pengerrysalue / Paaluväli	Tulvakynnysten harjakorkeus N_{43} [m]	Joen vedenkorkeus N_{43} [m]	Joen vedenkorkeus N_{43} [m] (uusi)	Korkeuksien erotus [m]
Rintala / 926+00 – 930+00	39,10	39,14	39,57	+0,47
Tieksi / 926+50 – 930+00	39,10	39,14	39,57	+0,47
Halkosaari / 887+30 – 889+30	38,80	38,99	39,42	+0,62
Halkosaari / 845+30 – 847+30	38,40	38,78	39,19	+0,79

Keväällä 2013 tapahtuneen tulvan aikana vedenkorkeus saavutti Nikkolan sillan kohdalla korkeimmillaan tason $N_{43} +40,78$ m. Vesi ei kuitenkaan virrannut tulvakynnysten yli jääkannen padottavan vaikutuksen seurauksena. Malkakosken tulvakynnystä vesi virtasi yli. Lisäksi syystulvan 2012 aikana joen vedenpinta kävi tulvakynnysten kohdalla ylimmillään kynnysten harjakorkeuden tasolla, mutta vesi ei virrannut kynnysten yli. Tuolloin Nikkolan sillan kohdalla vedenkorkeus kävi

korkeimmillaan tasolla $N_{43} + 40,44$ m. (Huhtamäki 2013) Näiden havaintojen perusteella kesä- ja syystulvatilanteissa Nikkolan vedenkorkeuden ollessa $N_{43} + 40,40$ m vesi ei siis välttämättä virtaisi tulvakynnysten yli. Mikäli vesi virtaisi kyseisellä vedenkorkeudella tulvakynnysten yli, tulisi tulvakynnysten harjakorkeutta nostaa, jotta tässä tutkimuksessa tehdyn optimointilaskelman tulokset olisivat totuudenmukaisia.

Optimointiongelman epäyhtälömuotoiset rajoiteyhtälöt on esitetty yhtälöissä 10–17. Q_{joki} tarkoittaa Kyrönjoen tulvavirtaamaa, eli Nikkolan virtaaman HQ 1/20 ylittävää virtaamaosaa. Kyrönjoen virtaaman ylärajaksi Nikkolan sillan kohdalla on määritelty $263 \text{ m}^3/\text{s}$, mikä vastaa samalla kohdalla vedenkorkeutta $N_{43} + 40,40$ m. Kyseinen virtaama voi kuitenkin käytännössä olla liian suuri penkereiden vakavuuden kannalta. Lisäksi edellä on todettu, että kyseistä virtaamaa vastaavalla vedenkorkeudella vesi saattaa virrata penkereiden tulvakynnysten yli. Virtaamaa $263 \text{ m}^3/\text{s}$, tai vedenkorkeutta $N_{43} + 40,40$ m, ei kannata myöskään välttämättä käyttää yleisenä raja-arvona pengerrysalueiden tulvaluukkujen aukaisulle, sillä jo pienemmät tulvatilanteet aiheuttavat asutusalueella vahinkoja. Virtaamasta $263 \text{ m}^3/\text{s}$ vähennetään Nikkolan sillan kohdan vedenkorkeutta $N_{43} + 40,00$ m vastaava virtaama $235 \text{ m}^3/\text{s}$, jolloin saadaan optimointilaskelmassa käytettäväksi joen virtaaman ylärajaksi noin $28 \text{ m}^3/\text{s}$.

Pengerrysalueiden tulvaluukkujen maksimivirtaamat epäyhtälöissä 12, 14 ja 16 ovat yhtälöillä 2–4 laskettujen luukkujen keskimääräisten virtaamien suurimpia arvoja pyöristettynä alas lähimpään kymmeneen. Rintalan pengerrysalueen Röyskölän tulvaluukun keskimääräiseksi maksimivirtaamaksi on todellisen $40 \text{ m}^3/\text{s}$ sijasta määrätty $30 \text{ m}^3/\text{s}$, sillä rajoiteyhtälön 18 mukaan Röyskölän ja Ionojan tulvaluukkujen keskimääräisten virtaamien on oltava yhtä suuret. Käytännössä Röyskölän ja Ionojan tulvaluukkujen keskimääräisten maksimivirtaamien on havaittu olevan noin $25 \text{ m}^3/\text{s}$ (Huhtamäki 2013).

$$Q_{\text{joki}} \leq 28 \text{ m}^3/\text{s} \quad (10)$$

$$Q_{\text{joki}} \geq 0 \text{ m}^3/\text{s} \quad (11)$$

$$Q_{\text{Rintala}} \leq 30 \text{ m}^3/\text{s} \quad (12)$$

$$Q_{\text{Rintala}} \geq 0 \text{ m}^3/\text{s} \quad (13)$$

$$Q_{\text{Tieksi}} \leq 30 \text{ m}^3/\text{s} \quad (14)$$

$$Q_{\text{Tieksi}} \geq 0 \text{ m}^3/\text{s} \quad (15)$$

$$Q_{\text{Halkosaari}} \leq 10 \text{ m}^3/\text{s} \quad (16)$$

$$Q_{\text{Halkosaari}} \geq 0 \text{ m}^3/\text{s} \quad (17)$$

$$Q_{\text{Rintala}} = Q_{\text{Tieksi}} \quad (18)$$

Optimointiongelma vaatii lisäksi myös yhden yhtälömuotoisen rajoitteen, jonka mukaan tulvaluukkujen ja joen virtaamien summa on vakio. Virtaamien summan täytyy olla yhtä suuri kuin Kyrönjoen kerran 20 vuodessa toistuvan virtaaman ylittävä virtaamaosuus Q_{Tulva} , kuten kaavassa 19 on esitetty.

$$Q_{\text{Tulva}} = Q_{\text{joki}} + Q_{\text{Rintala}} + Q_{\text{Tieksi}} + Q_{\text{Halkosaari}} \quad (19)$$

Erisuuruisia tulvatilanteita voidaan tutkia vaihtelemalla Q_{Tulva} :n arvoa. Tutkitut virtaamatilanteet on esitetty taulukossa 12.

7.6 Optimointiongelman ratkaiseminen

Tulvapengerrysalueen ja taajama-alueen vahinkofunktioiden perusteella minimoitavaksi tavoitefunktiksi saadaan:

$$f(Q_{\text{joki}}, Q_{\text{Rintala}}, Q_{\text{Tieksi}}, Q_{\text{Halkosaari}}) = f(Q_{\text{joki}}) + f(Q_{\text{Rintala}}) + f(Q_{\text{Tieksi}}) + f(Q_{\text{Halkosaari}}) \quad (20)$$

Kyseessä on epälineaarinen optimointiongelma, joten sen ratkaisemiseksi voidaan käyttää esimerkiksi Newtonin menetelmää tai Uzawan menetelmää. Nyt optimointiongelmaan haetaan ratkaisuja Matlabin optimointityökalujen avulla. Laskennassa käytetään Matlabin komentoa `fmincon`. Kyseinen komento pyrkii löytämään minimin rajoitetulle epälineaariselle optimointiongelmalle, joka on muotoa

$$\min_x f(x) \quad (21)$$

$$\text{siten, että } \begin{cases} c(x) \leq 0 \\ ceq(x) = 0 \\ A \cdot x \leq b \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \leq ub, \end{cases} \quad (22)$$

jossa b ja beq ovat vektoreita, A ja Aeq ovat matriiseja, $c(x)$ ja $ceq(x)$ ovat funktioita, jotka luovat vektorit ja $f(x)$ on funktio, joka luo skalaarin. $f(x)$, $c(x)$ ja $ceq(x)$ voivat olla epälineaarisia funktioita. x , lb ja ub voidaan esittää joko vektoreina tai matriiseina. Minimiarvon etsiminen alkaa alkuarvauksesta. Algoritmi `fmincon` käyttää optimointimenetelmänä toistetun kvadraattisen optimoinnin menetelmää (SQP - menetelmä). (MathWorks 2013a)

7.6.1 Optimointimenetelmä

SQP-menetelmät (Sequential Quadratic Programming) eli toistetun kvadraattisen optimoinnin menetelmät ovat eräs optimointimenetelmien luokka, joissa optimointiongelman Lagrangen funktiota arvioidaan kvadraattisella mallilla. SQP-menetelmät soveltuvat sellaisten optimointiongelmien ratkaisemiseen, joissa sekä kohdefunktio että rajoitefunktiot ovat epälineaarisia. Rajoitetun optimointiongelman yleinen muoto on esitetty kaavassa 23.

$$\min_x f(x), \text{ kun } g(x) \leq 0 \text{ ja } h(x) = 0, \quad (23)$$

jossa $f(x)$ on kohdefunktio ja $g(x)$ ja $h(x)$ rajoitefunktioita. (Haataja ym. 2002: 356)

Optimointiongelman Lagrangen funktion yleismuoto on

$$L(x, \lambda) = f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(x), \quad (24)$$

jossa λ_i Lagrangen kerroin.

Pääitointiaskeleella optimointiongelman Lagrangen funktion Hessen matriisista H_k tehdään positiivisesti definiitti approksimaatio käyttämällä kvasi-Newton päivitysmenetelmää. Tässä tapauksessa kvasi-Newton -menetelmä on BFGS -menetelmä (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno), joka on esitetty kaavoilla 25–27.

$$H_{k+1} = H_k + \frac{q_k q_k^T}{q_k^T s_k} - \frac{H_k s_k s_k^T H_k}{s_k^T H_k s_k}, \quad (25)$$

$$\text{jossa} \quad s_k = x_{k+1} - x_k \quad (26)$$

$$\text{ja } q_k = (\nabla f(x_{k+1}) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot \nabla g_i(x_{k+1})) - (\nabla f(x_k) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot \nabla g_i(x_{k+1})), \quad (27)$$

kun $\lambda_i, i = 1, \dots, m$ ja λ_i ovat arvioita Lagrangen kertoimista.

SQP-menetelmien erityispiirteenä on se, että jokaisella iterointiaskeleella ratkaistaan niin kutsuttu kvadraattinen alaongelma. Alaongelma luodaan approksimoidun Hessen matriisin H_k avulla ja samalla linearisoidaan ongelman epälineaariset rajoitteet. (Barclay ym. 1998: 208; MathWorks 2013b) Alaongelma on muotoa

$$\min_{d \in \mathbb{R}^n} \frac{1}{2} d^T H_k d + \nabla f(x_k)^T d \quad (28)$$

$$\nabla g_i(x_k)^T d + g_i(x_k) = 0, i = 1, \dots, m_e$$

$$\nabla g_i(x_k)^T d + g_i(x_k) \leq 0, i = m_e + 1, \dots, m.$$

Jokaisella iterointiaskeleella kvadraattista alaongelmaa käytetään löytämään suunta kohti seuraavaa iteraatiopistettä siten, että alaongelma ratkaistaan jonkin QP -algoritmin (Quadratic Programming) avulla ja ratkaisua, eli vektoria d_k , käytetään uuden iteraation muodostamiseen. Iteraatio on muotoa

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k. \quad (29)$$

Askelpituusparametri α_k määritetään line search -menetelmällä siten, että tavoitefunktiolle saavutetaan riittävä lasku. (MathWorks 2013b)

7.6.2 Laskennan tulokset

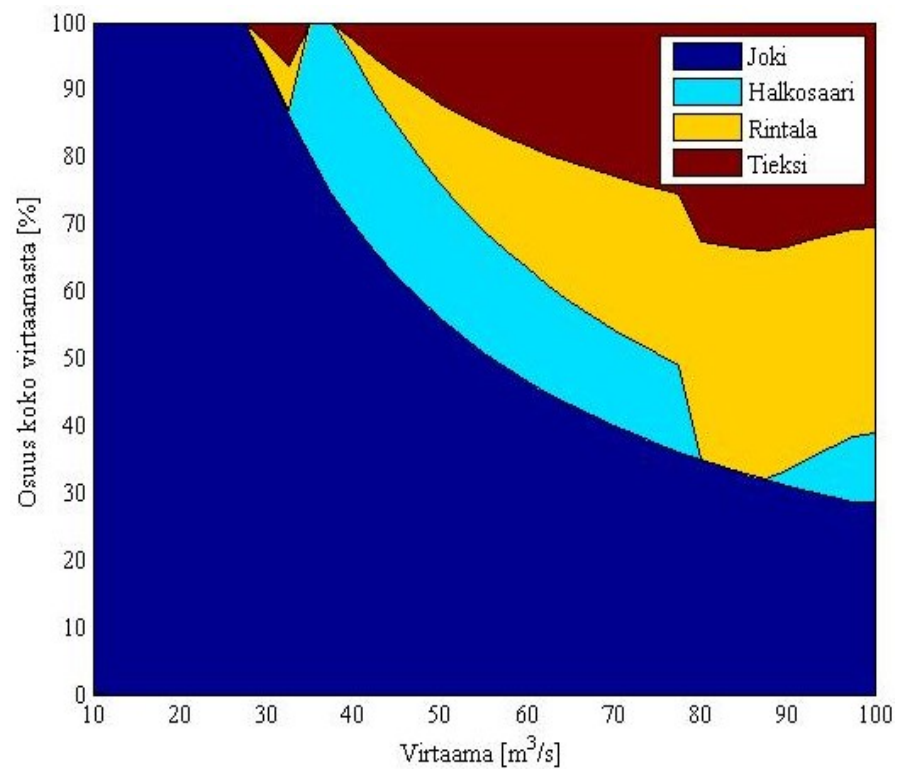
Optimointiongelman ratkaisuksi haettiin funktiota, joka esittäisi vahinkokustannusten kannalta optimaalisen tavan jakaa Kyrönjoen tulvavirtaama pengerrysalueiden ja joen välillä. Ongelmalle annettiin siis useampia lähtöarvoja, jotka kuvasivat Kyrönjoessa

olevan tulvavirtaaman suuruutta. Tulvavirtaamalla tarkoitetaan tässä tapauksessa virtaamaosuutta, joka ylittää Nikkolan vedenkorkeutta $N_{43} + 40,00$ m vastaavan virtaaman $\sim 235 \text{ m}^3/\text{s}$. Lähtöarvoina käytetyt tulvavirtaamat on esitetty tummennettuina taulukon 13 vasemmassa sarakkeessa. Niitä vastaavat optimoinnissa käytetyt virtaamien alkuarvaukset eri virtaamakohteille määrättiin jakamalla lähtöarvoina käytetyt tulvavirtaamat neljällä. Taulukossa 13 on esitetty myös optimointilaskelmien tulokset eli Matlabin fmincon -algoritmillä lasketut virtaama-arvot joessa, Rintalan Röyskölän tulvaluukulla, Tieksin Ionojan tulvaluukulla sekä Halkosaaren pumppaamon luukulla.

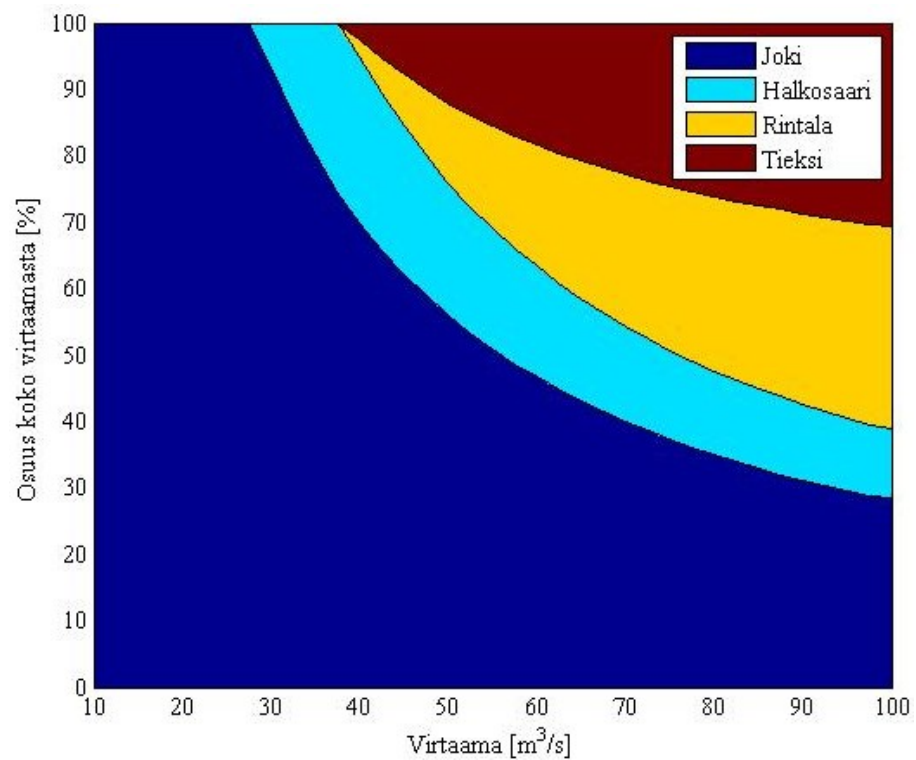
Kuva 24 esittää kuvaajamuodossa taulukon 13 virtaama-arvot. Kuvaajasta voidaan siis lukea optimaaliset virtaamat joelle ja pengerrysalueiden tulvaluukuille, kun jaettava tulvavirtaama kasvaa arvosta $10 \text{ m}^3/\text{s}$ arvoon $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Tulvavirtaamien $28\text{--}35 \text{ m}^3/\text{s}$ sekä $80\text{--}90 \text{ m}^3/\text{s}$ välillä näkyvät poikkeamakohtat pengerrysalueiden virtaama-alueiden rajoissa johtuvat pengerrysalueiden tulvavahinkofunktioiden arvoista kyseisillä virtaamaväleillä. Todellisuudessa kuvaajaa voitaisiin tulkita siten, että kuvaajassa näkyvät poikkeama-alueet hylättäisiin kuvan 25 mukaisesti.

Taulukko 13. Kyrönjoelle määrätty tulvavirtaamat Q_{Tulva} ja optimoidut virtaama-arvot.

Q_{Tulva}	Q_{joki}	Q_{Rintala}	Q_{Tieksi}	$Q_{\text{Halkosaari}}$
10	10	0	0	0
20	20	0	0	0
30	28	0,9338	0,9338	0,1324
40	28	1	1	10
50	28	6	6	10
60	28	11	11	10
70	28	16	16	10
80	28	26	26	0
90	28	30	30	2
100	28,5	30,5	30,5	10,5



Kuva 24. Optimoitujen virtaamien osuudet kokonaisvirtaamasta eri tulvatilanteissa.



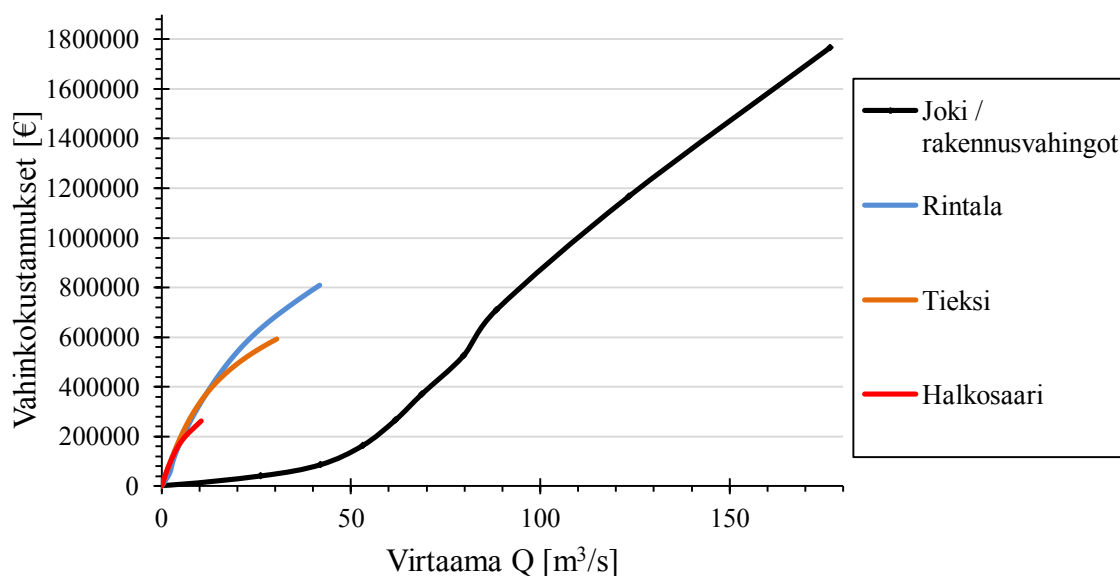
Kuva 25. Muokattu kuvaaja optimoitujen virtaamien osuudesta kokonaisvirtaamasta.

Optimointilaskelman ratkaisut antavat eri tulvavirtaamille vain niitä vastaavat optimaaliset virtaamajaot, eivätkä käsittele virtaaman nousua joessa jatkuvana tapahtumasarjana. Siten esimerkiksi kuvaajan 24 virtaaman $80 \text{ m}^3/\text{s}$ kohdalla virtaamien jakotapa perustuu tilanteeseen, jossa pengerrysalueille ei ole vielä johdettu vettä ollenkaan. Todellisuudessa jaettavan tulvavirtaaman noustessa tasaisesti arvoon $80 \text{ m}^3/\text{s}$, ei Halkosaaren pumppaamon luukkuja kannata väliaikaisesti sulkea.

Taulukosta 13 ja kuvaajasta 25 voidaan nähdä, että minimikustannukset saavutetaan, kun joen virtaaman annetaan nousta sille asetettuun ylärajaan asti ennen pengerrysalueiden tulvaluukkujen avaamista. Samanlaisia tuloksia saatiin, vaikka joen virtaaman yläraja nostettiin optimointilaskelmissa arvoon $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Tämä johtuu siitä, että joen eli rakennus- ja irtaimistovahinkojen kustannusfunktio poikkeaa suuresti pengerrysalueiden kustannusfunktioista. Rakennusten ja irtaimistojen kustannusfunktiossa vahinkokustannukset nousevat joen virtaaman kasvaessa aluksi suhteellisen hitaasti, kun taas pengerrysalueiden kustannusfunktioissa kustannukset nousevat jyrkästi alusta lähtien virtaaman kasvaessa.

Vahinkofunktioiden ero näkyy hyvin kuvassa 26, jossa on esitetty kaikkien kohteiden vahinkofunktiot samassa kuvaajassa. Pengerrysalueiden vahinkofunktioiden muodot ovat riippuvaisia tulvaluukkujen käyttöajan pituudesta. Tässä tutkimuksessa käyttöajaksi on määrätty jokaiselle tulvaluukulle kaksi vuorokautta. Pidemmällä käyttöajalla pengerrysalueiden vahinkokustannukset nousisivat eri keskivirtaamilla suuremmiksi ja lyhyemmällä ne jäisivät pienemmiksi. Kuvan 26 virtaama-akselin arvot tarkoittavat pengerrysalueiden tapauksessa tulvaluukkujen keskimääräisiä virtaamia kahden vuorokauden käyttöajalla ja joelle Kyrönjoen edellä määriteltä tulvavirtaamaa

Q_{Tulva} .



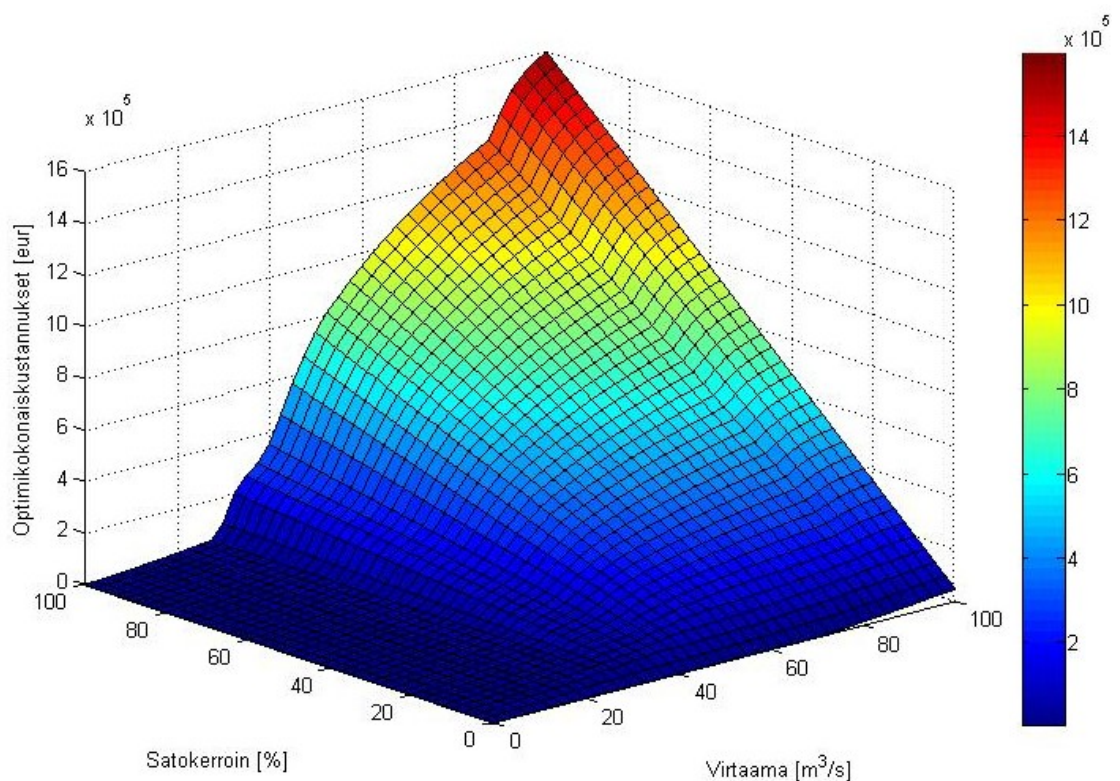
Kuva 26. Kyrönjoen rantojen asutusalueiden ja pengerrysalueiden vahinkofunktiot.

Taulukossa 14 on esitetty optimointilaskelmien tuloksina saadut eri tulvatilanteissa syntyvät arvioidut minimikustannukset kahdessa erilaisessa sadonkorjuutilanteessa. Oikeanpuoleisessa sarakkeessa esitetyt kustannukset syntyvät, kun pengerrysalueiden pelloilla olevasta sadosta 50 % on korjattu ja vasemmanpuoleisen sarakkeen kustannukset, kun koko sato on vielä korjaamatta.

Taulukko 14. Optimoidut tulvavahinkokustannukset, kun pelloilla on koko sato korjaamatta ja, kun sadosta 50 % on korjattu.

Q_{Tulva}	Vahinkokustannukset [€], kun 100 % sadosta korjaamatta	Vahinkokustannukset [€], kun 50 % sadosta korjaamatta
10	13 748	13 748
20	29 811	29 811
30	98 008	71 366
40	356 530	200 630
50	744 470	394 600
60	1 010 300	527 520
70	1 209 400	627 060
80	1 231 900	638 300
90	1 402 300	723 490
100	1 592 600	819 140

Kuvan 27 kuvaajassa on esitetty optimoitujen tulvavahinkokustannusten muutos suhteessa joen tulvavirtaaman suuruuteen ja pelloilla olevan korjaamattoman sadon prosentuaaliseen määrään tässä tutkimuksessa arvioidusta mahdollisesta maksimista. Taulukosta 14 ja kuvaajasta 27 voidaan tehdä sama huomio: mitä vähemmän pengerrysalueiden pelloilla on korjaamatonta satoa, kun alueille johdetaan vettä, sitä pienemmiksi tulvavahinkokustannukset jäävät, vaikka joen tulvavirtaama kasvaisi suureksi.



Kuva 27. Optimoidut tulvavahinkokustannukset suhteessa tulvavirtaamaan ja korjaamattoman sadon suhteelliseen määrään.

8 TULOSTEN ARVIOINTI

Optimointilaskelmien tulosten perusteella Kyrönjoen vedenpinnan kannattaa antaa tulvatilanteessa nousta laskelmissa määrätyle joen maksimivedenpinnantasolle eli Nikkolan sillan kohdalla tasolle $N_{43} +40,40$ m, jonka jälkeen pengerrysalueiden tulvaluukut on avattava. Näin saavutetaan laskelmien mukaan kesä- ja syystulvien tilanteessa minimivahinkokustannukset. Kyrönjoen vedenpinnankorkeuden maksimia ei määrätty optimointilaskelmien avulla, vaan tulvakarttoja ja aiempien tulvien aikaisia tapahtumia tarkastelemalla. Tulvakartoista pyrittiin määrittämään sellainen vedenkorkeus, jolla vesi ei vielä nousisi joesta tulvapenkereiden yli pengerrysalueille. Nikkolan sillan vedenkorkeudella $N_{43} +40,40$ m vesi voi tulvakarttojen perusteella ylittää penkereet muutamissa kohdissa joen alajuoksulla. Kyseiset kohdat ovat pääasiassa pengerrysalueiden tulvakynnyksiä. Syksyn 2012 tulvan aikana vesi ei kuitenkaan uhannut tulvapenkereiden vakavuutta, vaikka vedenpinnankorkeus kävi Nikkolan sillan kohdalla ylimmillään korkeudella $N_{43} +40,44$ m. Syystulvan 2012 aikana vesi ei virrannut yli myöskään penkereisiin tehdyistä tulvakynnyksistä. (Huhtamäki 2013) Nikkolan sillan kohdalle määritettyyn maksimivedenkorkeuteen $N_{43} +40,40$ m päädyttiin sekä tässä työssä käytetyn että korjatun virtausmallin pohjalta tehtyjen tulvakarttojen avulla.

Optimointilaskelmien perusteella tulvavahinkokustannukset nousisivat yli 44 000 euron, mikäli tulvapengerrysalueita ei otettaisi käyttöön ja joen vedenpinnan annettaisiin tulvatilanteessa nousta Nikkolan sillan kohdalla tasolle $N_{43} +40,40$ m, eikä veden uhkaamia rakennuksia suojattaisi tulvavedeltä mitenkään. Todellisuudessa kustannukset jäisivät todennäköisesti pienemmiksi, sillä kyseisellä vedenkorkeudella kastuvat rakennukset on totuttu tulvatilanteissa suojaamaan erilaisilla väliaikaisilla tulvasuojelurakenteilla. Kyseiset rakennukset ovat aiempien tulvien aikana joutuneet tulvaveden uhkaamiksi ja kastelemiksi, vaikka pengerrysalueille on johdettu vettä jo vedenkorkeuden ylittäessä Nikkolassa tason $N_{43} +40,00$ m. Tulvavahinkojen korvauskäytäntöjen muuttuessa vuoden 2014 alusta lähtien on kannattavaa suojata vähintäänkin tulvatason HW 1/50 alapuolella sijaitsevat rakennukset pysyvillä tulvasuojelurakenteilla, sillä vakuutusyhtiöt eivät korvaa pienempien tulvien rakennuksille aiheuttamia tulvavahinkoja. Korjatun virtausmallinnuksen tulosten

perusteella Nikkolan sillan kohdalla HW 1/50 on noin $N_{43} +40,45$ m, joten tulvaveden uhkaamien rakennusten pysyvä suojaus kannattaisi ulottaa kyseisen vedenkorkeuden osoittamalle tasolle asti.

Korjaamattoman sadon suhteellista määrää tarkasteltaessa on huomioitava, että tässä tutkimuksessa 50 % korjattu sato tarkoittaa sitä, että puolet sadosta on korjattu jokaisella pengerrysalueella ja jokaisella pengerrysalueen korkeusvälillä. Todellisuudessa on ensin arvioitava tulvatilanteessa veden alle todennäköisimmin jäävä peltoalue ja vasta sitten siltä korjatun sadon prosentuaalinen määrä sen sijaan, että tarkasteltaisiin koko pengerrysalueiden sadonkorjuutilannetta. Suurin osa tyhjästä peltoaloista voi sijoittua joko ensimmäiseksi veden alle jäävälle alueelle tai pengerrysalueiden korkeimmille alueille. Sadonkorjuuajankohdilla ja -tavoilla voi siten olla suuri vaikutus syntyviin tulvavahinkokustannuksiin. Optimointituloksista taulukossa 14 voidaan huomata, että mitä suurempi osa peltojen sadosta on korjattu, sitä pienemmiksi tulvakustannukset jäävät, jos vettä joudutaan johtamaan pengerrysalueille.

Optimointitulosten perusteella tulvavirtaaman ylittäessä arvon $40 \text{ m}^3/\text{s}$ (joen kokonaisvirtaamana $\sim 275 \text{ m}^3/\text{s}$), Halkosaaren pumppaamon tulvaluukku kannattaa avata kokonaan, mutta Tieksin ja Rintalan alueille kannattaa päästää vettä pienemmillä virtaamilla. Tulos johtuu pengerrysalueiden kustannusfunktioiden muodoista. Funktioiden perusteella Halkosaaren pengerrysalueella syntyy pienemmät kustannukset kyseisessä tilanteessa. Tulokseen vaikuttaa myös hieman rajoiteyhtälö 18, eli vaatimus siitä, että Ionojan ja Röyskölän tulvaluukkujen virtaamien on oltava yhtä suuret. Paras käsitys suositellusta virtaamajaosta eri tulvatilanteissa saadaan kuvan 26 kuvaajasta. Yksinkertaistettuina tulokset kertovat, että tulvatilanteessa Halkosaaren tulvaluukku voidaan avata aina kokonaan ja Röyskölän ja Ionojan tulvaluukkujen virtaamat on pidettävä yhtä suurina. Mikäli Rintalan ja Tieksin pengerrysalueilta olisi tulvatilanteessa suurin osa sadosta jo korjattu, tulokset muuttuisivat todennäköisesti siten, että Halkosaaren alueelle kannattaisi johtaa vettä pienemmällä virtaamalla.

Kyrönjoen vedenpinnan noustessa Nikkolan sillan kohdalla korkeudelle $N_{43} +40,40$ m voi aiheutua ongelmia, jotka täytyy selvittää ennen kuin vedenpinnan voidaan antaa syystulvalla nousta kyseiselle tasolle. Esimerkiksi Saarakkalanrinnan

jätevedenpuhdistamon purkuviemäri voi jäädä tulvaveden alle siten, että jätevedet leviävät ympäristöön (Ämmälä 2008: 35–36). Lisäksi Ilmajoen keskustaajaman alueella on muutama rakennus, joihin vesi voi nousta jo alemmillakin vedenkorkeuksilla. Kyseiset rakennukset olisi suojattava pysyvillä tulvasuojelurakenteilla, kuten tulvavalleilla.

Tulosten perusteella poikkeuksellisen suuressa kesä- tai syystulvatilanteessa veden johtamista pengerrysalueille voidaan optimoida siten, että vahinkokustannuksia syntyisi mahdollisimman vähän. Mallintamalla optimoituja tulvanhallintatoimia, eli luomalla optimoiduista virtaamista virtausmallit ja tulvavaarakartat, voidaan etukäteen tutkia missä suurimmat vahingot tapahtuvat. Näin voidaan jatkossa kehittää vahinkoalttiiden kohteiden tulvasuojelua ja vähentää vahinkokustannuksia lisää. Tässä työssä suoritettujen optimointilaskelmien tulokset eivät ole välttämättä täysin käyttökelpoisia etenkin asutusalueiden tulvavahinkokustannusten arviointiin, sillä virtausmallin antamat vedenkorkeudet poikkesivat hieman työn loppupuolella korjatun virtausmallin antamista vedenkorkeuksista. Virtausmallien erojen perusteella Ilmajoen ja Kurikan alueella syntyvät tulvavahinkokustannukset olisivat todennäköisesti arvioituja pienemmät.

8.1 Virhelähteet

Tutkimuksen ensimmäiset virhelähteet liittyvät Kyrönjoen pohjan kaikuluotaukseen, jonka tuloksilla on suora vaikutus veden esiintymisalueisiin tulvavaarakartoilla. Kaikuluotauksen tarkkuus oli noin 10 cm, joka on kuitenkin melko pieni virhe verrattuna tulvavaarakarttojen luomisessa käytetyn korkeusmallin KM2 tarkkuuteen. Korkeusmallin KM2 tarkkuus on noin 30 cm. Virtausmallinnuksessa virhettä aiheuttivat virheelliset virtaamien lähtötiedot ja epätarkkuudet mallin kalibroinnissa, minkä seurauksena mallinnustulosten vedenpinnankorkeudet eivät kuvaa mallinnettua tulvatilanteita aivan tarkasti. Virtausmallin korjaamisen ja uuden kalibroinnin jälkeen havaittiin, että tässä työssä käytetyn virtausmallin vedenkorkeudet olivat Jalasjoen ja Kauhajoen jokihaarasta Seinänsuun pumppaamolle saakka 0–79 cm korkeampia ja joen alajuoksulla 0–68 cm matalampia kuin niiden todellisuudessa pitäisi olla. Myös

virtausmallinnuksen yksinkertaistaminen yksiulotteiseksi vakiovirtausmalliksi saattoi jonkin verran heikentää mallinnuksen tulosten tarkkuutta.

Seuraavaksi virhettä rakennusten kustannusfunktioon on voinut aiheuttaa tulva-alueille sijoittuvien rakennusten laskentamenetelmä. Rakennusten määrä ja veden nousukorkeus niiden kohdalla eri tulvatilanteissa arvioitiin tulvavaarakartoista silmämääräisesti. Rakennusvahinkofunktioihin on voinut aiheuttaa virhettä myös rakennusten laadun ja arvon arviointitapa. Rakennusten arvon määrittämisessä käytettiin Finanssialan Keskusliiton määrittämiä keskimääräisiä neliöhintoja eri rakennustyypeille. Suurin osa tutkimusalueella sijaitsevista epäselvistä rakennuksista tarkastettiin paikan päällä. Tulvavaara-alueelle saattoi kuitenkin jäädä rakennuksia, joista ei ollut maanmittauslaitoksen maastotietokannassa rakennuspolygonia tai tietoja rakennus- ja huoneistorekisterissä. Tällaisia rakennuksia ei voitu laskea kustannusfunktioon mukaan. Toisaalta osa kustannusfunktioon sisällytetyistä piharakennuksista saattoi todellisuudessa olla arvottomia tai sellaisia, joille ei haettaisi tulvan sattuessa vahingonkorvauksia.

Rakennusvahinkofunktiossa ei ole huomioitu rakennusten kellareita, mikä voi aiheuttaa funktioon jonkin verran virhettä. Tarkastelualueen rakennuksista kuitenkin vain hyvin harvoissa on kellari ja tulvatilanteissa kellarit pyritään pitämään kuivina pumppaamalla ja tukkimalla salaojat ja viemärit. Toisaalta virhettä kustannusfunktioon voivat aiheuttaa rakennukset, joihin vesi tulvii jokeen laskevien ojien ja uomien kautta. Osaa näistä rakennuksista ei voitu määrittää tulvavaarakartoilta. Asuinalueen kustannustarkastelusta on jätetty huomiotta myös liiketoiminnan keskeytymisestä aiheutuvat kulut, mikä johtuu tosin siitä, että tarkasteltu veden leviämisalue ei ulottunut liiketoiminta-alueelle. Kustannuksista on jätetty pois myös kaikki pumppaamot, muut yhdyskuntatekniikan rakennukset ja katujakokaapit sekä autoille, teille, ojille ja silloille mahdollisesti aiheutuvat vahingot. Lisäksi puutarhoille ja korjatulle sadolle mahdollisesti aiheutuvien vahinkojen kustannuksia ei ole huomioitu kustannusfunktiossa. Tarkastelualueella ei ollut kaupalliseen toimintaan keskittyneitä puutarhoja ja korjatun sadon sijaintia ja arvoa olisi ollut mahdotonta arvioida tässä tutkimuksessa.

Epätarkkuudet korkeusmallissa KM2 ovat saattaneet vaikuttaa myös pengerrysalueiden kustannusfunktioihin. Virhettä on voinut aiheutua myös peltolohkorekisterin tiedoista, mikäli ne ovat olleet vanhentuneita. Tutkimuksessa oli kuitenkin tarkoitus tutkia satojen keskimääräisiä arvoja pengerrysalueilla, joten mahdollisesti vanhentuneet tiedot viljeltävistä kasvilajeista tai niiden aloista eivät aiheuttaneet kustannusfunktioon tutkimuksen kannalta haitallista virhettä. Hieman virhettä kustannusfunktioihin aiheutunee kuitenkin siitä, että funktioissa ei ole huomioitu kasvilajien vedenkestokykyä tai vedenkorkeuden ja peittoajan vaikutusta kasvien vahingoittumiseen. Kustannusfunktioissa ei ole huomioitu myöskään pengerrysalueiden tyhjennyksestä aiheutuvia pumppauskustannuksia tai -säästöjä, mikäli pumppaukselta vältytään. Sekä rakennus- että satovahinkofunktioiden sovituksista aiheutunut virhe on hyvin pieni, sillä sovitus tehtiin kuutiollisten splinien interpolaatiolla.

Myös optimointilaskelman matemaattisessa mallissa tehdyt oletukset saattoivat aiheuttaa tuloksiin virheitä. On esimerkiksi kyseenalaista, miten suuri vaikutus Halkosaaren tulvaluukun käytöllä on vedenpinnan laskuun Ilmajoen taajaman alueella, sillä luukku sijaitsee melko kaukana joen alajuoksulla taajamaan nähden (Huhtamäki 2013). Tulvaluukkujen käytön oletettiin vaikuttavan yläjuoksulle Koskenkorvan padolle saakka ja alajuoksulle Skatilan sillalle asti. Rakennusvahinkojen laskenta lopetettiin siis noin 15 km ennen Kyrönjoen laskua Vassorinlahteen. Oletus virtaaman poiston vaikutuksen loppumisesta Koskenkorvan padolle ei välttämättä pidä paikkaansa. Tulvaluukkujen virtaama poistettiin yhtä suurena niin luukkujen yläpuolisista kuin alapuolisistakin virtaama-arvoista, mikä ei välttämättä vastaa todellista tilannetta.

Tarkan kuvan saamiseksi tulvaluukkujen käytön vaikutuksesta joen vedenpintaan olisi pitänyt tehdä useita erilaisia virtausmallinnuksia erilaisilla tulvaluukkujen virtaama-arvoilla. Lisäksi olisi pitänyt tehdä näiden virtausmallinnusten pohjalta kaikkia virtaamatilanteita kuvaavat tulvavaarakartat. Tutkimuksen laskelmiin ja tuloksiin aiheuttavat virhettä myös ristiriidat tulvaluukkujen laskennallisten ja todellisten virtaamien välillä. Tutkimuksessa käytettiin tulvaluukuille laskennallisia virtaamia ja alaveden, eli pengerrysalueiden puoleisen vedenkorkeuden, vaikutus tulvaluukkujen virtaamiin jätettiin huomiotta. Todellisuudessa alavesi voi vaikuttaa tulvaluukkujen virtaamaan melko paljonkin alentamalla luukkujen keskimääräisiä virtaamia.

8.2 Mahdollisuudet nykyisten käytäntöjen muuttamiseen

Nykyisten tulvasuojelukäytäntöjen muuttaminen, eli pengerrysalueiden käyttöönoton viivästyttäminen tulvatilanteessa, olisi tulvavahinkojen ehkäisyyn ja tulvasuojelutoimenpiteiden kannalta mahdollista ja kesä- ja syystulvien tilanteessa todennäköisesti jopa suositeltavaa. Käytäntöjen muuttaminen vaatisi kuitenkin pysyvän tulvasuojauksen rakentamista tietyille Ilmajoen tulvariskialueen rakennuksille. Näistä rakennuksista kaksi sijaitsee Ilmajoen keskustaajaman alueella Fossilassa ja kolmas Palontien sillan lähellä Riihitien itäpäässä. Myös Sakarintien rakennusten pysyvää tulvapengertä jouduttaisiin mahdollisesti korottamaan, sillä virtausmallinnustulosten tarkastelun perusteella veden noustessa Nikkolan sillan kohdalla tasolle $N_{43} +40,40$ m, nousisi vesi Sakarintien pengerryksen kohdalla yli 0,5 m penkereen käytön kannalta sallitun vedenkorkeuden $N_{43} +40,48$ m yläpuolelle (Suomen Salaojakeskus Oy 2010: 52). Mikäli kyseisiä rakennuksia ei suojella pysyvillä ja riittävillä tulvasuojelurakenteilla, voi nykyisen tulvasuojelukäytännön muuttaminen aiheuttaa vaikean ristiriitatilanteen valtion tulvasuojelumenetelmillä saaman edun ja asukkaiden edun välille.

Rakennusten tulvavahinkojen korvauskäytäntöjen muuttuessa vuoden 2014 alusta yksityishenkilöt voivat hakea vahinkokorvauksia vain vakuutusyhtiöltään, mikäli rakennus- tai irtaimistovahingot on aiheuttanut harvemmin kuin tilastollisesti kerran 50 vuodessa toistuva tulva. Nikkolan sillan kohdalla kerran 50 vuodessa toistuva vedenkorkeus on uusimman (korjatun) virtausmallinnuksen tulosten mukaan noin $N_{43} +40,45$ m. Tulvasuojelukäytännön muuttaminen vaatisi siis rakennusten pysyvien tulvasuojelurakenteiden ulottamista vähintään Nikkolan vedenkorkeutta $N_{43} +40,40$ m vastaavalle tasolle, jotta valtion käyttämä tulvasuojelumenetelmä ei aiheuttaisi vahinkoa alueen asukkaille.

Mikäli tulevaisuudessa pengerrysalueiden käytön lupaa muutetaan siten, että vettä voidaan johtaa alueille vasta vedenpinnan ylittäessä Nikkolassa tason $N_{43} +40,40$ m, on kyseinen vedenkorkeustaso huomioitava myös myönnettäessä rakennuslupia tulvavaara-alueelle. Rakennuslupia ei saisi myöntää kyseisen vedenkorkeustason alapuolelle. Nykyisen käytännön mukaan uudet rakennukset sijoitetaan Kyrönjoen vesistöalueella

kerran 100 vuodessa toistuvan vedenpinnankorkeuden yläpuolelle. Kyseiseen vedenkorkeuteen lisätään alinta rakennuskorkeutta määrättäessä vielä 0,5–1,5 m lisäkorkeus. (Yli-Mannila 2013) Uusimman Kyrönjoen virtausmallinnuksen tulosten perusteella Nikkolan sillan kohdalla kerran 100 vuodessa toistuva vedenkorkeus on noin $N_{43} + 40,78$ m.

Tulvasuojelukäytännön muuttamisessa on huomioitava myös vedenpinnan nousun vaikutus jätevesipumppaamoihin. Tiedetään, että jo virtaamatilanteessa HQ 1/20 yksi jätevedenpumppaamo Ilmajoella kastuu ja nostaa jäteveden muutamien talojen kellareihin. Veden nousu kellareihin voidaan estää korottamalla ylivuotokynnyksiä, millä estetään jokiveden pääsy viemäriverkostoon. (Ämmälä 2008: 37) Kyseinen toimenpide olisi tehtävä aina joen vedenpinnan noustessa HW 1/20 -tasolle. Kerran 20 vuodessa toistuvalla tulvalla vesi voi uhata myös muutamaa katujakokaappia, joita voidaan suojella ottamalla ne pois päältä ennen kuin vesi nousee HW 1/20 -tasolle. Kaappeja voitaisiin mahdollisesti myös nostaa pysyvästi korkeammalle. (Ämmälä 2008: 39–41)

Vedenpinnan nousun salliminen nykyisiä rajoja korkeammalle saattaa vaatia myös tulvapenkereiden korottamista, mikäli niille arvioidaan tapahtuvan siitä haittaa. Tulvapengerrysalueiden nykyiset käyttöönottokriteerit perustuvat Kyrönjoen yläosan vesistötyön lupaan vuodelta 1995 (Lupa nro 16–17/1995/2). Käytännön muuttaminen vaatisi luvan muokkaamisen ja uusimisen. Lupaa muutettaessa voitaisiin mahdollisesti myös huomioida sadonkorjuutilanteen vaikutus pengerrysalueiden käyttöön tulvavesien varastoinnissa. Mitä suurempi osa pengerrysalueilla olevasta sadosta on syystulvan aikana korjattu, sitä suositeltavampaa on johtaa pengerrysalueille vettä mahdollisesti jo ennen kuin vedenkorkeus $N_{43} + 40,40$ m Nikkolan sillan kohdalla ylittyy. Toisaalta veden johtaminen pengerrysalueille aiheuttaa aina tulvan jälkeen pumppauskustannuksia, vaikka satovahinkokustannuksia ei syntyisi.

Lokakuussa 2012 vedenpinta nousi Nikkolan sillan kohdalla korkeudelle $N_{43} + 40,00$ m ja Rintalan, Tieksin sekä lopulta myös Halkosaaren pengerrysalueille alettiin päästää vettä. Vedenpinta jatkoi kuitenkin nousua ja saavutti Nikkolan sillan kohdalla korkeimmillaan tason $N_{43} + 40,44$ m. (Yli-Mannila & Haukilehto 2013)

Tulvapengerrysalueiden tulvaluukkujen avaaminen vasta Nikkolan vedenkorkeuden saavuttaessa tason $N_{43} + 40,40$ m voi siis johtaa vedenkorkeuden nousuun vielä kyseistä tasoa korkeammalle. Tilanteeseen vaikuttavat kuitenkin myös mahdollisuus johtaa vettä tekojärviin ja rankkasadetulvan arvioitu kesto. Mikäli pengerrysalueiden käytön lupakäytäntöjä muutetaan, on lupaam sisällytettävä lisäksi mahdollisuus avata pengerrysalueiden tulvaluukut jo ennen kuin vedenkorkeus ylittää Nikkolan sillalla tason $N_{43} + 40,40$ m, jos joen alajuoksulla voidaan olettaa syntyvän vahinkoja.

9 YHTEENVETO

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli rakennusvahinkoihin ja satovahinkoihin perustuvien kustannusfunktioiden avulla optimoida Kyrönjoen yläosan tulvapengerrysalueiden käyttöä, eli veden johtamista alueille syystulvatilanteissa. Tulokset johtivat kuitenkin tilanteeseen, jossa kustannusten minimoimiseksi oli suositeltua kaikissa tulvatilanteissa antaa joen vedenpinnan nousta ennalta asetettuun ylärajaan asti ennen veden johtamista pengerrysalueille. Tulos johtui kustannusfunktioiden muotojen merkittävistä eroista: rakennusvahinkokustannukset eivät saavuta joen pienillä tulvavirtaamilla lähellekään yhtä suuria arvoja kuin satovahinkokustannukset tulvaluukkujen pienillä virtaamilla. Joen virtaamalle täytyi siis löytää yläraja jollain muulla keinolla kuin optimointilaskelman avulla. Apuna käytettiin kokemuksia aiempien tulvien vedenkorkeuksista ja ArcGIS:llä luotuja tulvavaarakarttoja.

Tulvavaarakartoista havaittiin, että vedenkorkeuden ylittäessä Nikkolan sillalla tason $N_{43} + 40,34$ m, vesi voi virrata joesta tulvapenkereiden yli tulvakynnysten kohdalla. Kuitenkin syystulvan 2012 aikana vesi ei virrannut tulvakynnysten yli, vaikka Nikkolan sillan kohdalla vedenkorkeus kävi tasolla $N_{43} + 40,44$ m. Lisäksi tiedettiin, että kevättulvan 2013 aikana tulvapenkereet eivät vaurioituneet vaikka Nikkolassa vedenkorkeus kävi tasolla $N_{43} + 40,78$ m. Näiden tietojen avulla päätettiin asettaa Kyrönjoen virtaaman ylärajaksi optimointilaskelmissa Nikkolan sillan vedenkorkeutta $N_{43} + 40,40$ m vastaava virtaama kyseisellä kohdalla. Nykyään Kyrönjoen tulvapengerrysalueille saa johtaa vettä, kun vedenkorkeus Nikkolan sillan kohdalla Ilmajoella ylittää arvon $N_{43} + 40,00$ m.

Tutkimuksen tärkeimpänä tuloksena saatiin aikaan laskentamenetelmä, jolla voidaan tutkia pienimmät vahinkokustannukset aiheuttavaa tapaa johtaa vettä tulvapengerrysalueille syystulvien aikana. Laskentamenetelmä perustuu epälineaariseen optimointiin Matlab-ohjelman fmincon-algoritmilla. Algoritmi fmincon käyttää optimointimenetelmänä SQP-menetelmää eli toistetun kvadraattisen optimoinnin menetelmää. Lisäksi tutkimuksen tuloksena saatiin suositus vedenpinnankorkeudelle, johon Kyrönjoen veden voidaan korkeintaan antaa nousta tulvatilanteessa. 40 cm:n lisäys nykyiseen pengerrysalueiden käyttöönoton oikeuttavaan vedenpinnankorkeuteen

kertoo tulvasuojeluvaatimusten muutoksesta Kyrönjoen tulvariskialueella. Muutoksen tarpeeseen ovat osaltaan vaikuttaneet muuttuvat tulvavahinkojen korvauskäytännöt ja toisaalta – muuttuva ilmasto.

Tärkeimpiä tulvasuojelun ohjauskeinoja alueella ovat tulevaisuudessa tulvariskejä ehkäisevä kaavoitus ja rakennuslupien myöntäminen. Tarvetta on myös nykyisten tulvasuojelurakenteiden ylläpidolle ja niiden kunnon valvonnalle. Tämän tutkimuksen tulosten hyödyntäminen ja käyttöönotto vaatisi pysyvän tulvasuojelurakenteen rakentamista muutamille tutkimusalueen rakennuksille. Tulvasuojelurakenteet olisi tehtävä suojaamaan rakennukset vähintään harvemmin kuin kerran 50 vuodessa toistuvilta tulvilta, että ne riittäisivät oikeuttamaan rakennusten omistajat tulvavahinkokorvauksiin korvauskäytäntöjen muuttuessa vuoden 2014 alussa. Ilmastonmuutos voi lisätä suuria kesä- ja syystulvia Kyrönjoen vesistöalueella, mikäli rankkasateet yleistyvät. Tulvavahinkojen ei kuitenkaan tarvitse yleistyä tai kasvaa, jos sateiden aiheuttamiin tulviin osataan varautua ennalta.

Pengerrysalueiden käytön optimointia voitaisiin tutkia myös kevättulvatilanteissa siten, että pengerrysalueiden kustannusfunktio muodostettaisiin alueiden tyhjennyspumppauksista aiheutuvien kustannusten avulla. Lisäkustannuksia kevättulvien aikana saattaa aiheuttaa myös kevätkylvön myöhästyminen. Myös tässä tutkimuksessa olisi voitu huomioda pengerrysalueiden tyhjennyspumppauksen kustannukset. Ne päätettiin kuitenkin jättää pois alueiden kustannusfunktioista, sillä niistä olisi aiheutunut suhteellisesti melko pieni kustannuslisä verrattuna pengerrysalueiden satovahinkokustannuksiin.

LÄHDELUETTELO

- Aaltonen J, Hohti H, Jylhä K, Karvonen T, Kilpeläinen T, Koistinen J, Kotro J, Kuitunen T, Ollila M, Parvio A, Pulkkinen S, Silander J, Tiipohinen T, Tuomenvirta H & Vajda A (2008) Rankkasateet ja taajamatulvat (RATU). Suomen ympäristö 31/2008. 123 s. ISBN 978-952-11-3210-0.
- Aho J (2013) Diplomi-insinööri. Ympäristötekniikan insinööritoimisto Jami Aho. Seinäjoki. Haastattelu 25.4.2013.
- Ala-Luoma A (2013) Seinäjoen kunta. Puhelinkeskustelu: Jenni Lippo – Maaseutupäälikkö Arja Ala-Luoma 7.8.2013.
- Alasaarela E (1983) Ennakkoselvitys Kyrönjoen yläosan vesistötöiden työnaikaisista vaikutuksista ja valmistumisen jälkeisen käytön vaikutuksista Kyrönjoen laatuun. Vesihallituksen monistesarja 1983:202.
- Barclay A, Gill P E, Rosen J B (1998) SQP methods and their applications to numerical optimal control. International Series of Numerical Mathematics 124: 207–222. ISBN 978-3-0348-9780-8.
- Berning C, Viljoen M F, Du Plessis L A (2000) Loss functions for sugar-cane: Depth and duration of inundation as determinants of extent of flood damage. Water S.A. 26, (4): 527–530. ISSN 0378-4738.
- Brunner G W, CEIWR-HEC (2010) HEC-RAS River Analysis System User's Manual. Version 4.1. [verkkodokumentti]. [viitattu 28.5.2013]. Saatavissa: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_4.1_Users_Manual.pdf.
- Carter T R, Jylhä K, Perrels A, Fronzek S & Kankaanpää S (2005) FINADAPT scenarios for the 21st century: alternative futures for considering adaptation to climate change in Finland. FINADAPT Working Paper 2, Finnish Environment Institute Mimeographs 332, Helsinki, 42 s.
- Christensen J H, Carter T R, Rummukainen M, and Amanatidis G (2007) Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project. Climatic Change, 81 Supl. 1: 1-6. ISSN 0165-0009.
- Ekholm M (1993) Suomen vesistöalueet. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja 126 – sarja A. 163 s. ISBN 951-37-1087-4.
- Etelä-Pohjanmaan ELY-keskus (2011) Tulvariskien alustava arviointi Kyrönjoen vesistöalueella. 68 s. [verkkodokumentti]. Julkaistu 30.3.2011. [viitattu 11.2.2013]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=26356&lan=fi>, pdf-dokumentit: Kyrönjoki, osa 1 ja osa 2.
- Etelä-Pohjanmaan ELY-keskus (2013) Pientalon tulvaturvallisuusopas. 12 s. [verkkodokumentti]. [viitattu 29.4.2013]. Saatavissa: http://www.seinajoki.fi/tervetuloa_seinajoen_internetsivuille.html/46431.pdf.
- Erviö R (1975) Kyrönjoen vesistön rikkipitoiset viljelymaat. – Maatal.tiet. aikakirja 47.

Esri (2011) How Surface Volume (3D Analyst) works. [verkkodokumentti]. Julkaistu 11.10.2011. [viitattu 5.6.2013]. Saatavissa: http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/How_Surface_Volume_3D_Analyst_works/00q900000037000000/.

Finanssialan keskusliitto (2012) Rakennuksen hinnan arviointi 2012. 29 s. [viitattu 17.6.2013].

Ganji Z, Shokoohi A & Samani J M V (2012) Developing an agricultural flood loss estimation function (case study: rice). Natural Hazards. 64, (1): 405–419. ISSN 0921-030X.

Haataja J, Heikonen J, Leino Y, Rahola J, Ruokolainen J & Savolainen V (2002) Numeeriset menetelmät käytännössä. Tieteen tietotekniikan keskus CSC. 415 s. ISBN 952-9821-81-6. [verkkodokumentti]. [viitattu 1.8.2013]. Saatavissa: <http://www.csc.fi/oppaat/num.kayt/>.

Huhtamäki J (2012) Rakennusmestari. Etelä-Pohjanmaan ELY-keskus. Sähköposti 22.1.2013.

Huhtamäki J (2013) Rakennusmestari. Etelä-Pohjanmaan ELY-keskus. Puhelinkeskustelu 23.7.2013.

Huokuna M (2013) Yli-insinööri. Suomen ympäristökeskus. Sähköposti 29.1.2013.

Kaitera P (1941) Vedenkorkeusvaihteluiden vaikutuksesta rantamaiden pelto- ja niittyviljelykseen. Maataloushallituksen vesiteknillisiä tutkimuksia. 112 s.

Keskisarja V & Nikkarikoski H (2006) Tulvavesien pidättäminen valuma-alueella. Esimerkkikohteena Vääräjoen Kortejärvi. [verkkodokumentti]. Julkaistu 7.12.2006. [viitattu 5.6.2013]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=70217&lan=fi>.

Koivisto A-M, Bonde A & Aroviita J (2005) Kyrönjoen tekojärvien tila ja kehitys. Länsi-Suomen ympäristökeskus. Alueelliset ympäristöjulkaisut 406. 110 s. ISBN 952-11-2091-6.

Korhonen J & Haavanlammi E (2012) Hydrologinen vuosikirja 2006–2010. Suomen ympäristö 8/2012. Luonnonvarat. 234 s. ISBN 978-952-11-3988-8.

KTI (2001) Kiinteistötalouden keskeiset käsitteet. Rakennuksen pinta-alakäsitteet. [verkkodokumentti]. [viitattu 29.7.2013]. Saatavissa: <http://www.kti.fi/index.php?k=19005>.

Laitinen H & Sirviö H (2013) HYD-valikko. Suomen Ympäristökeskus. [viitattu 29.4.2013 ja 14.5.2013].

Länsi-Suomen ympäristökeskus (2000a) Kyrönjoki – elävä joki. [verkkodokumentti]. Julkaistu 12.5.2000. [viitattu 7.1.2013]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=61169>.

Länsi-Suomen ympäristökeskus (2000b) Kyrönjoki – elävä joki. Kuva. [verkkodokumentti]. Julkaistu 12.5.2000. [viitattu 7.1.2013]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=11468&lan=fi>.

Länsi-Suomen ympäristökeskus (2000c) Kyrönjoki ja sen sivuhaarat. [verkkodokumentti]. Julkaistu 18.2.2000. [viitattu 9.1.2013]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=265275&lan=fi&clan=fi>.

Maa- ja metsätalousministeriö (2003) Suurtulvatyöryhmän loppuraportti. Työryhmämuistio MMM 2003:6. 126 s. [verkkodokumentti]. Julkaistu 2003. [viitattu 27.8.2013]. Saatavissa: [www.mmm.fi/attachments/vesivarat/5fDcMTEhP/tr2003_6\[1.pdf](http://www.mmm.fi/attachments/vesivarat/5fDcMTEhP/tr2003_6[1.pdf).

Maa- ja metsätalousministeriö (2012) Poikkeuksellisten tulvien vahinkoihin voi saada korvausta. [verkkodokumentti]. Julkaistu 6.6.2011. [viitattu 1.2.2013]. Saatavissa: <http://www.mmm.fi/fi/index/etusivu/maatalous/tuet/vahinkojenkorvaaminen/tulvavahin got.html>.

Maanmittauslaitos (2013) Korkeusmalli 2 m. Korkeusmalli 10 m. [verkkodokumentti]. [viitattu 22.7.2013]. Saatavissa: <http://www.maanmittauslaitos.fi/digituotteet>.

Marttila P (2008) Anne Ämmälälle lähetetty sähköpostiviesti 5.2.2008.

MathWorks (2013a) Documentation Center. Optimization Toolbox, fmincon. [verkkodokumentti]. [viitattu 25.3.2013]. Saatavissa: <http://www.mathworks.se/help/optim/ug/fmincon.html>.

MathWorks (2013b) Documentation Center. Optimization Toolbox, Constrained Nonlinear Optimization Algorithms. [verkkodokumentti]. [viitattu 6.5.2013]. Saatavissa: <http://www.mathworks.se/help/optim/ug/constrained-nonlinear-optimization-algorithms.html#f26965>.

Michelsson R & Saari A (2009) Tulvavahinkojen korjauskustannukset. Teknillinen korkeakoulu, Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan laitoksen julkaisuja B:14 (TKK-R-B14). Espoo 2009. 82 s. ISBN 978-952-248-200-6.

Mustonen S, Kuusela J & Kuuskoski M (1982) RIL 141, Yleinen vesitekniikka. 433 s. ISBN 951-758-024-X.

Nakićenović N & Swart R (2000) Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. 599 s. ISBN 0-521-80081-1.

Nuotio E (2008) Etelä-Pohjanmaan vedet nyt ja tulevaisuudessa. Vaasa, Länsi-Suomen ympäristökeskus. Raportteja 1/2008. 164 s. ISBN 978-952-11-2972-8.

Ollila M (2002) Ylimmät vedenkorkeudet ja sortumariskit ranta-alueille rakennettaessa. Suositus alimmista rakentamiskorkeuksista. Ympäristöopas 52. Suomen ympäristökeskus ja Ympäristöministeriö, Maa- ja metsätalousministeriö. 53 s. ISBN 952-11-0413-9.

Orrenmaa A (2004) Kyrönjoen tulvasota. Länsi-Suomen ympäristökeskus. 120 s. ISBN 952-11-1639-0.

Pekurinen S (2013) Jälkivahingontorjunta- ja kuivauspäivät 2013. Vahinkokatsaus. Finanssialan Keskusliitto. [verkkodokumentti]. Julkaistu 7.2.2013. [viitattu 11.3.2013]. Saatavissa: <http://www.sppl.fi/files/1809/LuentoPekurinen.pdf>.

Pozo-Vázquez D, Esteban-Parra M J, Rodrigo F S & Castro-Díez Y (2001) A study of NAO variability and its possible non-linear influence on European surface temperature. *Climate Dynamics*. 17, (9): 701–715. ISSN 1432-0894.

Raivio (1961) Havaintoja Kyrönjoen kesätulvasta 1961.

Raivio T & Lonka H (2009) Tulvariskien hallinnan riskianalyttinen taustoitus. Gaia Consulting Oy. Loppuraportti. 24. [verkkodokumentti]. Julkaistu 8.9.2009. [viitattu 21.5.2013]. Saatavissa: http://www.mmm.fi/attachments/vesivarat/5tf8u9e7U/GAIA_tulva_loppuraportti_luonnos_010909.pdf.

Ranta E (1985) Kyrönjoen kalastosta ja kalaston tilaan vaikuttavista tekijöistä. Vesihallituksen tiedotus 259. Helsinki. 97s.

Rantakokko K (2002) Tulvavesien tilapäinen pidättäminen valuma-alueella. Kartoitus mahdollisuuksista Suomen oloissa. Suomen ympäristö 563. 87 s. ISBN 952-11-1170-4.

Rautio L M (2013) Vesistöyksikön päällikkö. Etelä-Pohjanmaan ELY-keskus. Vaasa. Haastattelut vuoden 2013 aikana.

Richards R P (1998) Manual of Standard Operating Procedures fo Hydrometric Surveys in B.C.. Ministry of Environment, Lands and Parks. [verkkodokumentti]. Julkaistu 2.11.1998. [viitattu 23.5.2013]. Saatavissa: <http://www.ilmb.gov.bc.ca/risc/pubs/aquatic/hydro/hydrmlv1-47.htm>.

Sane M, Alho P, Huokuna M, Käyhkö J & Selin M (2006) Opas yleispiirteisen tulvavaarakartoituksen laatimiseen. Suomen ympäristökeskus. Ympäristöopas 127. 73 s. ISBN 952-11-2162-9.

Savea-Nukala T, Rautio L M & Seppälä M (1997) Kyrönjoen tila ja vesiensuojelun taso. Alueelliset ympäristöjulkaisut 16. Länsi-Suomen ympäristökeskus. 167 s. ISBN 952-11-0063-X.

Silander J & Parjanne A (2012) Tulvariskien hallinnan euromääräisten vahinkojen ja hyötyjen arviointi. [verkkodokumentti]. [viitattu 17.6.2013]. Julkaisematon raportti. Suomen ympäristökeskus. 38 s. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=639&lan=fi>, sivun alin pdf-dokumentti.

Silander J, Vehviläinen B, Niemi J, Arosilta A, Dubrovin T, Jormola J, Keskisarja V, Keto A, Lepistö A, Mäkinen R, Ollila M, Pajula H, Pitkänen H, Sammalkorpi I, Suomalainen M & Veijalainen N (2006) Climate change adaptation for hydrology and water resources. FINADAPT Working Paper 6. Finnish Environment Institute Mimeographs 336. Helsinki. 52 s. ISBN 952-11-2108-4.

Suomen Salaojakeskus Oy (2010) Ilmajoen tulvariskien hallinnan yleissuunnitelma. 68 s. [verkkodokumentti]. Julkaistu 9.3.2010. [viitattu 30.1.2013]. Saatavissa: <http://www.environment.fi/download.asp?contentid=127299&lan=fi>.

Suomen ympäristökeskus (2011) Tulvasanasto. [verkkodokumentti]. Julkaistu 23.3.2011. [viitattu 10.1.2013]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=26342&lan=fi#a15>.

Suomen ympäristökeskus (2012a) Tulvat. [verkkodokumentti]. Julkaistu 25.10.2012. [viitattu 10.1.2013]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=140118&lan=fi>.

Suomen ympäristökeskus (2012b) Luontodirektiivin luontotyyppien esittelyt. Tulvaniityt (6450). [verkkodokumentti]. Julkaistu 27.11.2012. [viitattu 10.1.2013]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=119621&lan=fi>.

Suomen ympäristökeskus (2012c) Tulvakartoitus. [verkkodokumentti]. Julkaistu 24.9.2012. [viitattu 11.1.2013]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=384112&lan=fi&clan=fi>.

Suomen ympäristökeskus (2013) Tulvariskien hallinnan suunnittelu. [verkkodokumentti]. Julkaistu 21.3.2013. [viitattu 22.7.2013]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=1712&lan=fi>.

Syvänen K & Leiviskä P (2007) Kyrönjoen vesistön tulvatorjunnan toimintasuunnitelma. Länsi-Suomen ympäristökeskuksen raportteja 1/2007. 56 s. ISBN 978-952-11-2552-2.

Teppo A, Tolonen M, Korsu K, Sivil M, Koivurinta M, Marjomäki T, Koivisto A-M, Latvala J & Rautio L M (2006) Kyrönjoen yläosan vesistötöiden vaikutus ja Kyrönjoen tila vuosina 1975–2003. Suomen ympäristö 18/2006. Länsi-Suomen ympäristökeskus. 174 s. ISBN 952-11-2282-X.

Tervonen P (2013) Tarkastusinsinööri. Ilmajoen kunta. Sähköposti 12.7.2013.

Tuominen V (2012) Ylitarkastaja. Etelä-Pohjanmaan ELY-keskus. Sähköpostin liite (Excel-taulukko): Tulvavahinkoarvio 15 11 2012 yhteenveto. 21.1.2013.

Tuomola M (2008) Anne Ämmälälle lähetetty sähköpostiviesti 9.2.2008.

Tuononen E, Vähäsöyrinki E & Österlund P (1981) Vedenkorkeusvaihtelujen vaikutus rantamaiden viljelyyn ja puustoon. Vesihallituksen tiedotus 206. 124 s. ISBN 951-46-5073-5.

Turunen H (1985) Lakeuden joet. Etelä-Pohjanmaan vesienkäytön historia. Kytösavut XV. 288 s. ISBN 951-99703-9-8.

University of Utah (2002) Physics 3730/6720 Handouts. Cubic Spline Interpolation. [verkkodokumentti]. Julkaistu 30.10.2002. [viitattu 11.6.2013]. Saatavissa: http://www.physics.utah.edu/~detar/phys6720/handouts/cubic_spline/cubic_spline/node1.html.

Uppala S (1978) Extreme Distribution Functions for Daily and Monthly Precipitation in Finland. *Geophysica*, 15, (1): 17–39. ISSN 0367-4231.

USACE (1996) Depth-damage relationships for structures, contents, and vehicles. Prepared for U.S. Army Corps of Engineers. New Orleans, Louisiana. June 1996, Final report of G.E.C. Project No. 22316212. [viitattu 18.6.2013].

USACE (2003) Economic Guidance Memorandum 04-01: Generic Depth-Damage Relationships for Residential Structures with Basements (2003). Guidance for generic depth-damage curves for flood damage reduction studies. CECW-PG. [verkkodokumentti]. Julkaistu 10.10.2003. [viitattu 18.6.2013]. Saatavissa: <http://planning.usace.army.mil/toolbox/library.cfm?Option=Listing&Type=EGM&Search=Policy&Sort=Default>.

Vaasan vesi- ja ympäristöpiiri (1993) Kyrönjoen yläosan vesistötyö. Halkosaaren pengerryssuunnitelma. Kansio 9. Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksen arkisto.

Vaasan vesi- ja ympäristöpiiri – Viatek Tapiola Oy (1993) Kyrönjoen yläosan vesistötyö. Tarkistettu hankesuunnitelma. Yhteenveto yrityksestä ja sen vaikutuksista. Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksen arkisto.

Vaasan vesipiirin vesitoimisto (1993) Kyrönjoen yläosan vesistötyö. Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksen arkisto:

Tieksin pengerryssuunnitelma, K6.

Rintalan pengerryssuunnitelma, K7.

Iskan pengerryssuunnitelma, K8.

Halkosaaren pengerryssuunnitelma, K9.

Kitinojan pengerryssuunnitelma, K11.

Kylänpään suojapengerrykset, K12.

Vaismaa H (2013) SEEK/Ilmajoen maaseututoimisto. Sähköposti 30.1.2013.

Vejjalainen N & Vehviläinen B (2008) Ilmastomuutos ja patoturvallisuus – vaikutus mitoituslaskuihin. Suomen ympäristö 21/2008. 123 s. ISBN 978-952-11-3131-8.

Vejjalainen N, Jakkila J, Nurmi T, Vehviläinen B, Marttunen M & Aaltonen J (2012) Suomen vesivarat ja ilmastomuutos – vaikutukset ja muutoksiin sopeutuminen. WaterAdapt-projektin loppuraportti. Suomen ympäristö 16/2012. 138 s. ISBN 978-952-11-4017-4.

Vesihydro Oy ja Vaasan vesi- ja ympäristöpiiri. (1993) Kyrönjoen yläosan vesistötyön luonnontaloudelliset selvitykset.

Yli-Mannila S (2013) Vanhempi insinööri. Etelä-Pohjanmaan ELY-keskus. Vaasa. Haastattelut vuoden 2013 aikana.

Yli-Mannila S & Haukilehto K (2013) Lausunto tulvan poikkeuksellisuudesta Ilmajoen kunnassa Kyrönjoen, Tuoresluoman ja Tuomiluoman varrella. ELY-keskus. 7.1.2013 Seinäjoki.

Oiva (2013) Ympäristö- ja paikkatietopalvelu asiantuntijoille. Ympäristötiedon hallintajärjestelmä Hertta. [verkkopalvelu]. [viitattu useita kertoja 2013]. Saatavissa: <http://www.wp2.ymparisto.fi/scripts/oiva.asp>.

Ämmälä A (2008) Ilmajoen tulvariskikartoitus. Länsi-Suomen ympäristökeskus, nykyinen Etelä-Pohjanmaan ELY-keskus. Julkaistu 18.11.2008.

Karttaesitysten pohjakartat

Karttakeskus Oy, Lupa L4659

Maanmittauslaitos lupa nro 7/MML/12

Lait, asetukset, direktiivit ja oikeuden päätökset

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi tulvariskien arvioinnista ja hallinnasta (2007/60/EY).

Laki Kyrönjoen erityissuojelusta (1139/1991) Pykälä 4 §.

Laki poikkeuksellisten tulvien aiheuttamien vahinkojen korvaamisesta (284/1983). Pykälät 1 §, 2 § ja 6 §.

Laki poikkeuksellisten tulvien aiheuttamien vahinkojen korvaamisesta annetun lain kumoamisesta (1001/2011).

Laki satovahinkojen korvaamisesta (1214/2000). Pykälät 2 §, 4 §, 6 §, 8 §.

Laki satovahinkojen korvaamisesta annetun lain muuttamisesta (1002/2011). 8 a §.

Laki tulvariskien hallinnasta (620/2010). Pykälät 1 §, 4 §, 7 §, 8 § ja 11 §.

Länsi-Suomen vesioikeuden päätös nro 4/1984 D. Annettu 4.4.1984.

Länsi-Suomen vesioikeuden lupa nro 16–17/1995/2. Lupapäätös Kyrönjoen yläosan vesistötyöstä. Annettu 27.4.1995.

Patoturvallisuuslaki (494/2009). 26.6.2009.

LIITTEET

Liite 1. Satovahinkolaskelmissa käytetyt yksikköhinnat ja normisadot vuonna 2012.

Liite 2. Rintalan, Tieksin ja Halkosaaren pengerrysalueiden vesitilavuuden ja vahinkokustannusten välisten funktioiden pohjatiedot.

Liite 3. Vesitilavuuden ja vahinkokustannusten välisten funktioiden kuvaajat sekä kahden vuorokauden keskimääräisen virtaaman ja vahinkokustannusten välisen funktion kuvaajat Rintalan, Tieksin ja Halkosaaren pengerrysalueille. Kuvaajat on sovitettu Matlabin cubic spline interpolation -algoritmillä.

Liite 4. Tulvaluukkujen virtaamat patoaukon eri avauskorkeuksilla, keskimääräiset virtaamat patoaukon maksimikorkeuden mukaan, pengerrysalueille virtaavat vesimäärät kahden vuorokauden juoksutuksella ja niitä vastaavat satovahinkokustannukset.

Liite 5. Uudisrakennusten nettoneliöhinnat eri rakennusluokissa ja arvioidut neliöhinnat.

Liite 6. Asutusalueen tulvavahinkojen kustannusfunktion korkeusjako ja tarkastelualueen raja.

Liite 7. Optimointilaskelmien Matlab-koodit.

Liite 1. Satovahinkolaskelmissa käytetyt yksikköhinnat ja normisadot.

Taulukko 1. Satovahinkolaskelmissa käytetyt yksikköhinnat ja normisadot Maaseutuviraston vuoden 2012 määräysten mukaan.

Kasvi	Yksikköhinta [senttiä/kg] ₁	Normisato 2012 [kg/ha] ₂	Arvo [€/m ²]
Ruis	21,4	3000	0,0642
Syysvehnä	20,3	4000	0,0812
Kevätvehnä	20,3	4000	0,0812
Ohra	19,3	4000	0,0772
Kaura	18,6	3400	0,06324
Seosvilja	18,6	2700	0,05022
Rypsi	44,4	1200	0,05328
Kevätrapsi	44,4	2400	0,10656
Ruistankio	39	900	0,0351
Öljypellava	62	900	0,0558
Ruokaherne	30	3200	0,096
Kuivaheinä	11,2	3900	0,04368
Säilörehunurmi, tuorerehu ja viljelty laidun	2,3	21100	0,04853
Vihantavilja	2,3	12000	0,0276
Ruokaperuna	16	28300	0,4528
Ruokateollisuusperuna	10,8	33400	0,36072
Tärkkelysperuna	6,3	26900	0,16947
Sokerijuurikas	3,4	34500	0,1173

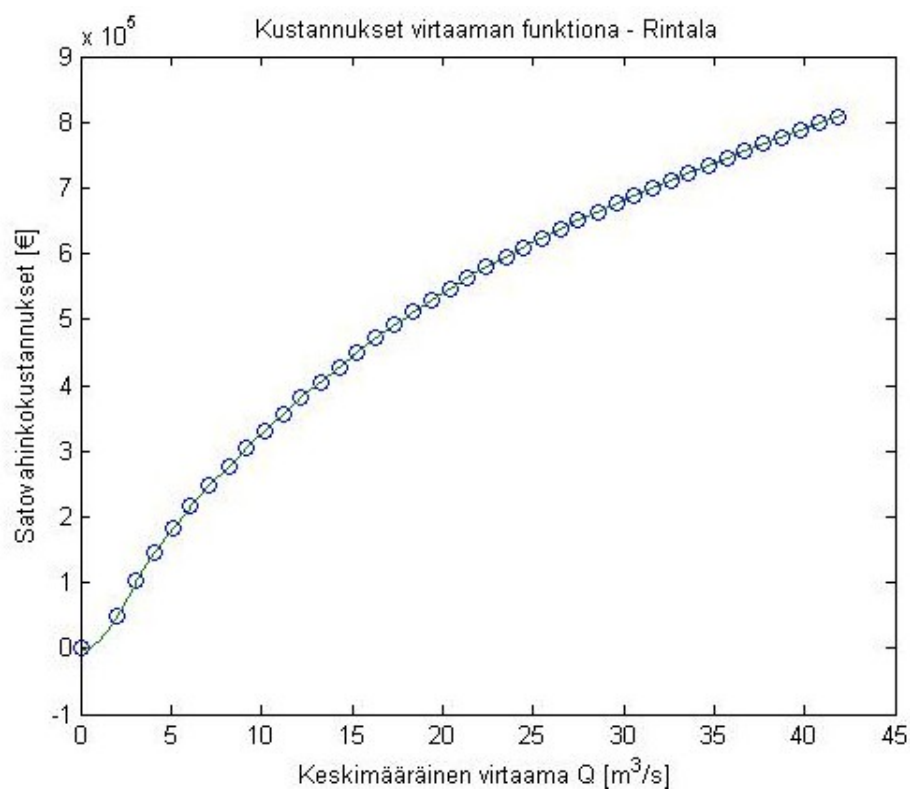
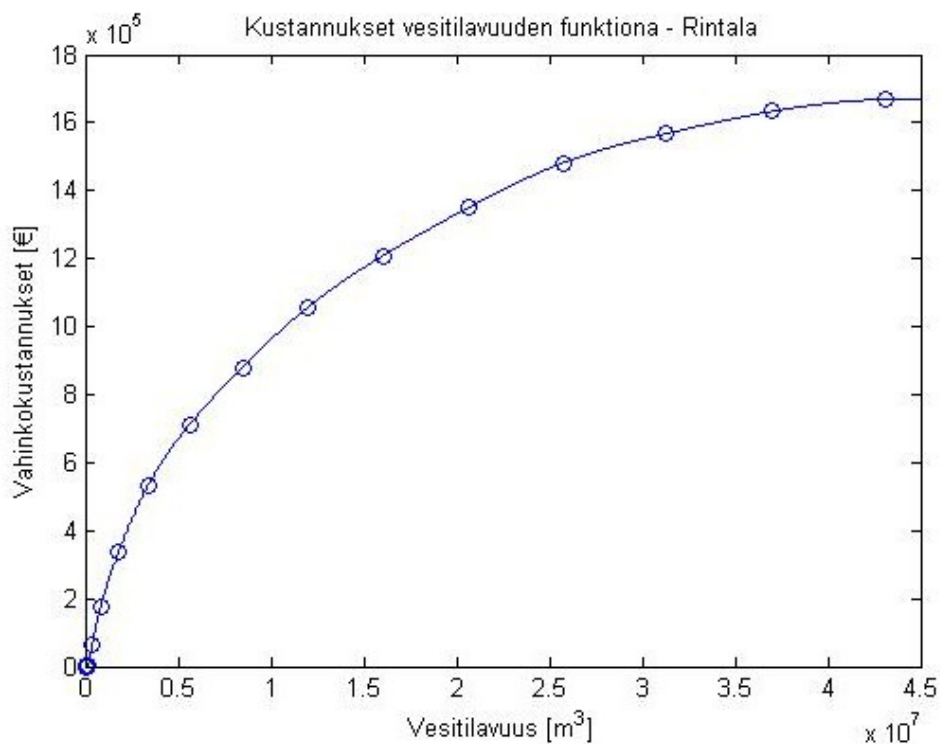
₁Maaseutuvirasto Määräys 18.2.2013. Dnro 495/54/2013.₂Maaseutuvirasto Määräys 17.7.2012. Dnro 1218/22/2012.

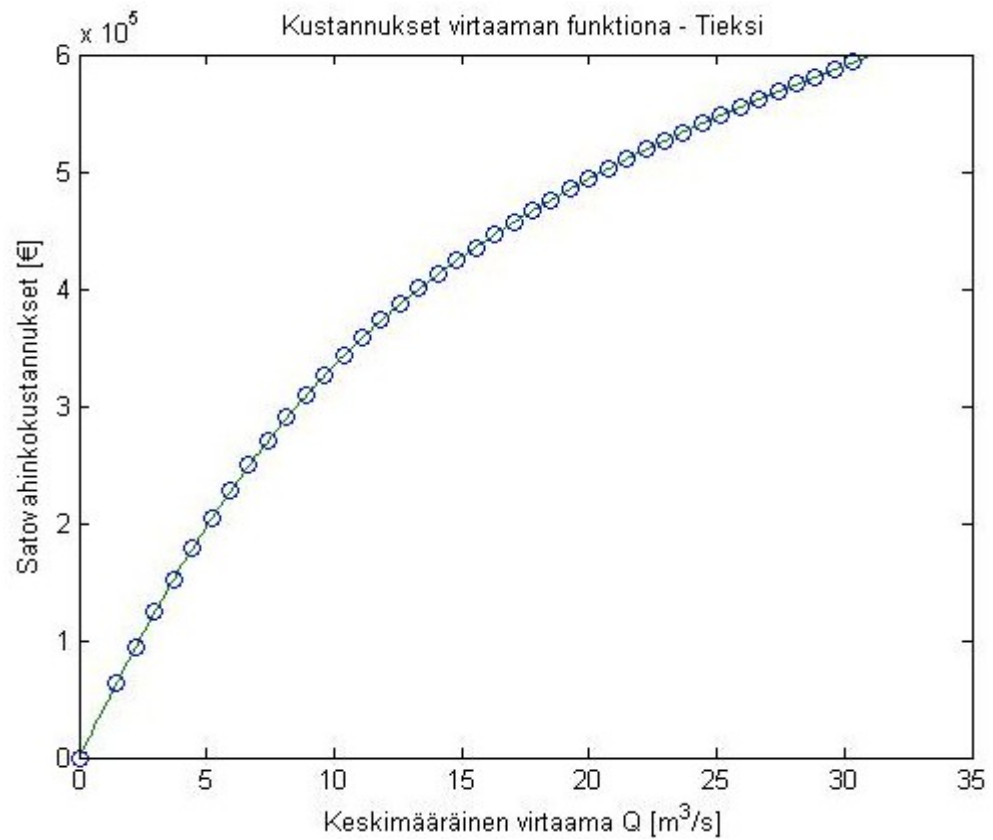
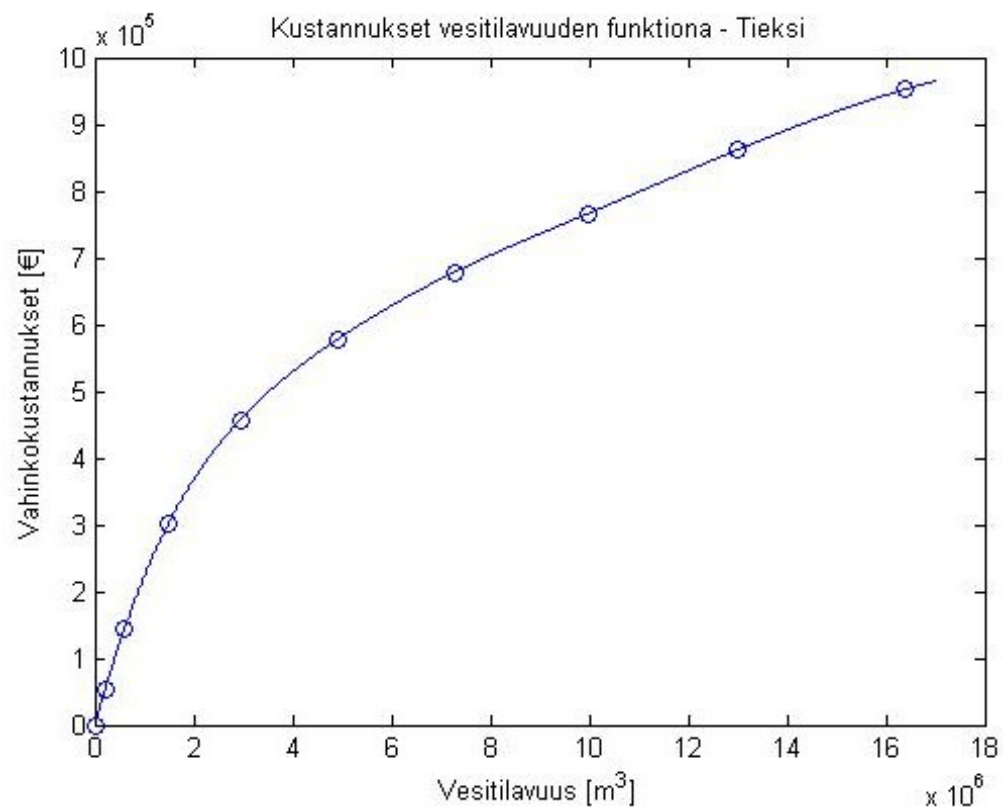
Liite 2. Rintalan, Tieksin ja Halkosaaren pengerrysalueiden vesitilavuuden ja vahinkokustannusten välisten funktioiden pohjatiedot.

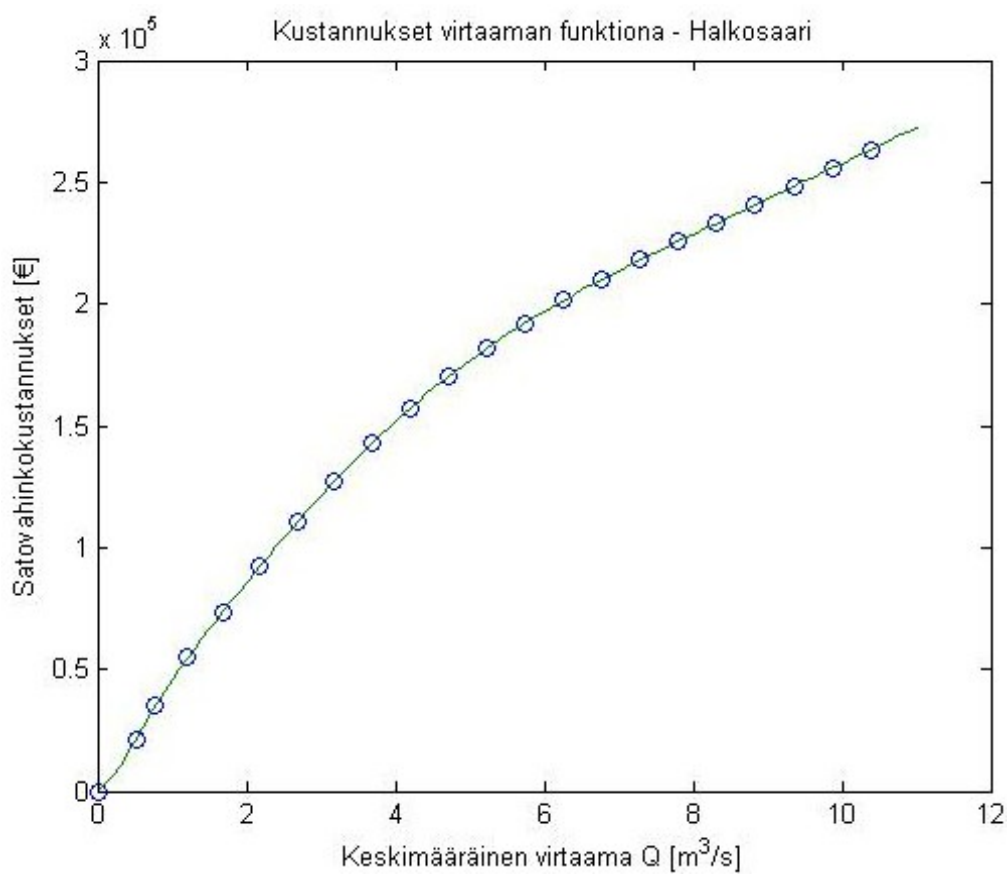
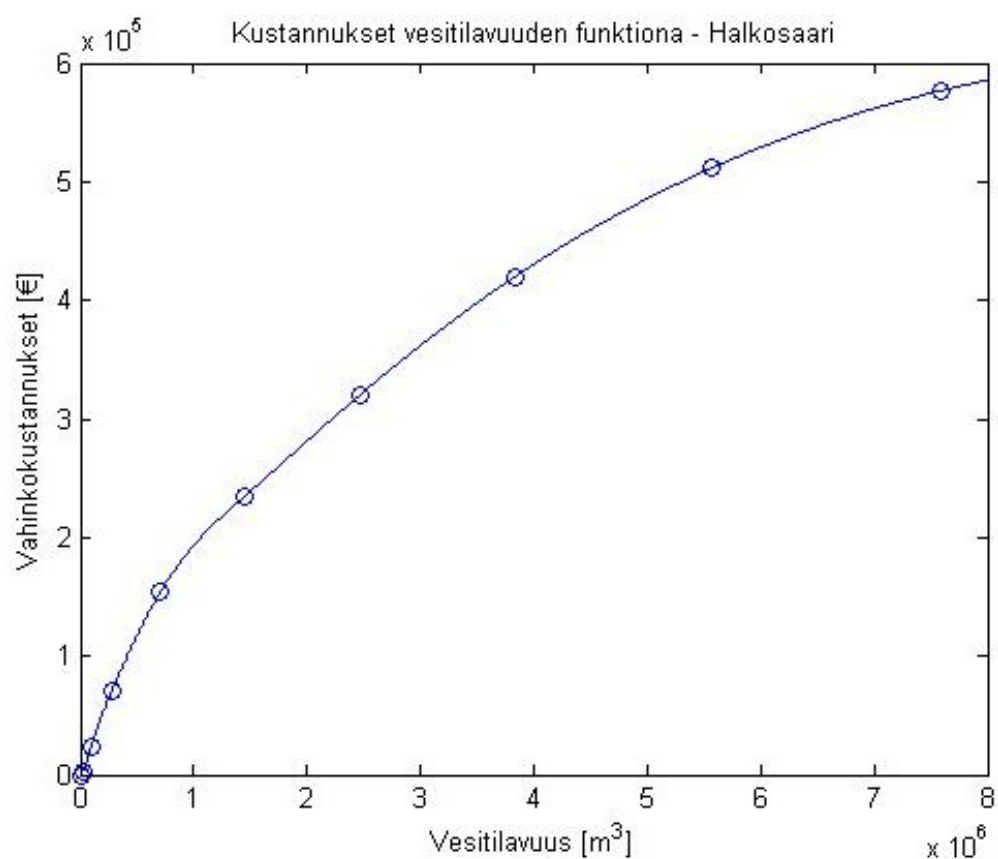
Taulukko 2. Rintalan, Tieksin ja Halkosaaren pengerrysalueiden vesitilavuuden ja vahinkokustannusten välisten funktioiden pohjatiedot.

Rintala:				
Korkeusväli N₂₀₀₀ [m]	Korkeusvälin arvo [€]	Korkeusvälin arvo kumulatiivisesti [€]	Pinta-ala A kumulatiivisesti [m²]	Tilavuus V kumulatiivisesti [m³]
34,083 - 37	66389,39	66389,39	963678,87	405215,13
37,25	111561,46	177950,86	2440326,26	859638,76
37,5	158417,66	336368,51	4641989,64	1797094,91
37,75	195286,12	531654,63	7393985,77	3370409,37
38	179559,88	711214,51	10005182,74	5630089,46
38,25	168769,72	879984,24	12398442,92	8493471,16
38,5	174356,81	1054341,05	14902862,98	11974112,05
38,75	153416,44	1207757,49	17181253,22	16053208,10
39	141569,45	1349326,94	19273959,43	20667268,17
Tieksi:				
Korkeusväli N₂₀₀₀ [m]	Korkeusvälin arvo [€]	Korkeusvälin arvo kumulatiivisesti [€]	Pinta-ala A kumulatiivisesti [m²]	Tilavuus V kumulatiivisesti [m³]
35,11 - 37,5	53170,16	53170,16	859850,06	211925,55
37,75	91301,75	144471,91	2158817,50	604134,10
38	156290,26	300762,17	4442383,85	1479235,96
38,25	156012,89	456775,06	6749542,77	2946813,37
38,5	120818,32	577593,38	8561846,04	4918095,18
38,75	100565,30	678158,68	10032254,52	7283930,18
39	87648,76	765807,44	11283883,47	9977144,88
39,25	95675,32	861482,75	12670010,57	13003201,04
39,5	90408,72	951891,48	14045580,23	16378223,79
Halkosaari:				
Korkeusväli N₂₀₀₀ [m]	Korkeusvälin arvo [€]	Korkeusvälin arvo kumulatiivisesti [€]	Pinta-ala A kumulatiivisesti [m²]	Tilavuus V kumulatiivisesti [m³]
34,832 - 36,5	2671,11	2671,11	36293,61	22201,51
37,00	21319,45	23990,56	352594,36	97527,85
37,25	46049,31	70039,87	1009107,86	274779,73
37,50	84185,49	154225,36	2249200,41	706058,90
37,75	79877,28	234102,65	3344746,51	1448877,92
38,00	86164,47	320267,12	4506745,31	2473968,22
38,25	99189,76	419456,87	5908433,41	3833215,73
38,50	91805,85	511262,72	7239823,34	5566467,49
38,75	65599,27	576861,99	8199875,23	7598552,41

Liite 3. Vesitilavuuden ja vahinkokustannusten välisten funktioiden kuvaajat sekä kahden vuorokauden keskimääräisen virtaaman ja vahinkokustannusten välisen funktion kuvaajat Rintalan, Tieksin ja Halkosaaren pengerrysalueille. Kuvaajat on sovitettu Matlabin cubic spline interpolation -algoritmilla.







Liite 4. Tulvaluukkujen virtaamat patoaukon eri avauskorkeuksilla, keskimääräiset virtaamat patoaukon maksimikorkeuden mukaan, pengerrysalueille virtaavat vesimäärät kahden vuorokauden juoksutuksella ja niitä vastaavat satovahinkokustannukset.

Taulukko 3. Röyskölän tulvaluukun virtaamat patoaukon eri avauskorkeuksilla, keskimääräiset virtaamat patoaukon maksimikorkeuden mukaan, Rintalan pengerrysalueelle virtaavat vesimäärät kahden vuorokauden juoksutuksella ja niitä vastaavat satovahinkokustannukset. Keskimääräisiä virtaamia laskettaessa tarkasteltiin virtaamia, jotka syntyvät, kun luukkuja avataan 5 cm:n välein.

Aukon maksimikorkeus [m]	Q [m ³ /s]	Keskimääräinen Q [m ³ /s]	Alueelle menevä vesimäärä kahdessa vuorokaudessa [m ³]:	Vesitilavuutta vastaava kustannus [€]
0	0,0	0,0	0,0	0
0,1	4,1	3,1	528590,9	102660
0,2	8,2	5,1	880984,8	182180
0,3	12,2	7,1	1233378,7	247160
0,4	16,3	9,2	1585772,6	304570
0,5	20,4	11,2	1938166,5	356800
0,6	24,5	13,3	2290560,4	405260
0,7	28,6	15,3	2642954,3	450120
0,8	32,6	17,3	2995348,2	491460
0,9	36,7	19,4	3347742,1	529330
1	40,8	21,4	3700136,0	563880
1,1	44,9	23,5	4052529,9	595430
1,2	48,9	25,5	4404923,8	624420
1,3	53,0	27,5	4757317,7	651270
1,4	57,1	29,6	5109711,7	676390
1,5	61,2	31,6	5462105,6	700200
1,6	65,3	33,6	5814499,5	723120
1,7	69,3	35,7	6166893,4	745380
1,8	73,4	37,7	6519287,3	767040
1,9	77,5	39,8	6871681,2	788160
2	81,6	41,8	7224075,1	808790

Taulukko 4. Ionojan tulvaluukun virtaamat patoaukon eri avauskorkeuksilla, keskimääräiset virtaamat patoaukon maksimikorkeuden mukaan, Tieksin pengerrysalueelle virtaavat vesimäärät kahden vuorokauden juoksutuksella ja niitä vastaavat satovahinkokustannukset. Keskimääräisiä virtaamia laskettaessa tarkasteltiin virtaamia, jotka syntyvät, kun luukkuja avataan 5 cm:n välein.

Aukon maksimikorkeus [m]	Q [m ³ /s]	Keskimääräinen Q [m ³ /s]	Alueelle menevä vesimäärä kahdessa vuorokaudessa [m ³]:	Vesitilavuutta vastaava kustannus [€]
0	0	0	0	0
0,1	3,0	2,2	383854,4	94600
0,2	5,9	3,7	639757,4	152130
0,3	8,9	5,2	895660,3	203660
0,4	11,8	6,7	1151563,3	249490
0,5	14,8	8,1	1407466,2	290190
0,6	17,8	9,6	1663369,2	326330
0,7	20,7	11,1	1919272,1	358420
0,8	23,7	12,6	2175175,1	386970
0,9	26,7	14,1	2431078,0	412500
1	29,6	15,5	2686981,0	435490
1,1	32,6	17,0	2942883,9	456470
1,2	35,5	18,5	3198786,9	475860
1,3	38,5	20,0	3454689,8	493890
1,4	41,5	21,5	3710592,8	510680
1,5	44,4	23,0	3966495,7	526390
1,6	47,4	24,4	4222398,7	541150
1,7	50,4	25,9	4478301,6	555100
1,8	53,3	27,4	4734204,6	568380
1,9	56,3	28,9	4990107,5	581140
2	59,2	30,4	5246010,5	593470

Taulukko 5. Halkosaaren pumppaamon luukun virtaamat patoaukon eri avauskorkeuksilla, keskimääräiset virtaamat patoaukon maksimikorkeuden mukaan, Halkosaaren pengerrysalueelle virtaavat vesimäärät kahden vuorokauden juoksutuksella ja niitä vastaavat satovahinkokustannukset. Keskimääräisiä virtaamia laskettaessa tarkasteltiin virtaamia, jotka syntyvät, kun luukkuja avataan 5 cm:n välein.

Aukon maksimikorkeus [m]	Q [m ³ /s]	Keskimääräinen Q [m ³ /s]	Alueelle menevä vesimäärä kahdessa vuorokaudessa [m ³]:	Vesitilavuutta vastaava kustannus [€]
0,0	0,0	0,0	0,0	0
0,1	1,04	0,78	134285,0	35090
0,2	2,07	1,21	208887,8	54700
0,3	3,11	1,68	290950,9	73680
0,4	4,14	2,18	375998,0	92290
0,5	5,18	2,68	462537,3	110250
0,6	6,22	3,18	549929,1	127240
0,7	7,25	3,69	637853,8	143000
0,8	8,29	4,20	726133,8	157350
0,9	9,33	4,71	814662,4	170200
1,0	10,36	5,23	903371,9	181700
1,1	11,40	5,74	992217,0	192040
1,2	12,43	6,26	1081166,5	201410
1,3	13,47	6,77	1170198,0	210000
1,4	14,51	7,29	1259295,0	218030
1,5	15,54	7,80	1348445,3	225680
1,6	16,58	8,32	1437639,6	233160
1,7	17,61	8,84	1526870,3	240650
1,8	18,65	9,35	1616131,9	248180
1,9	19,69	9,87	1705419,7	255750
2,0	20,72	10,39	1794729,9	263330

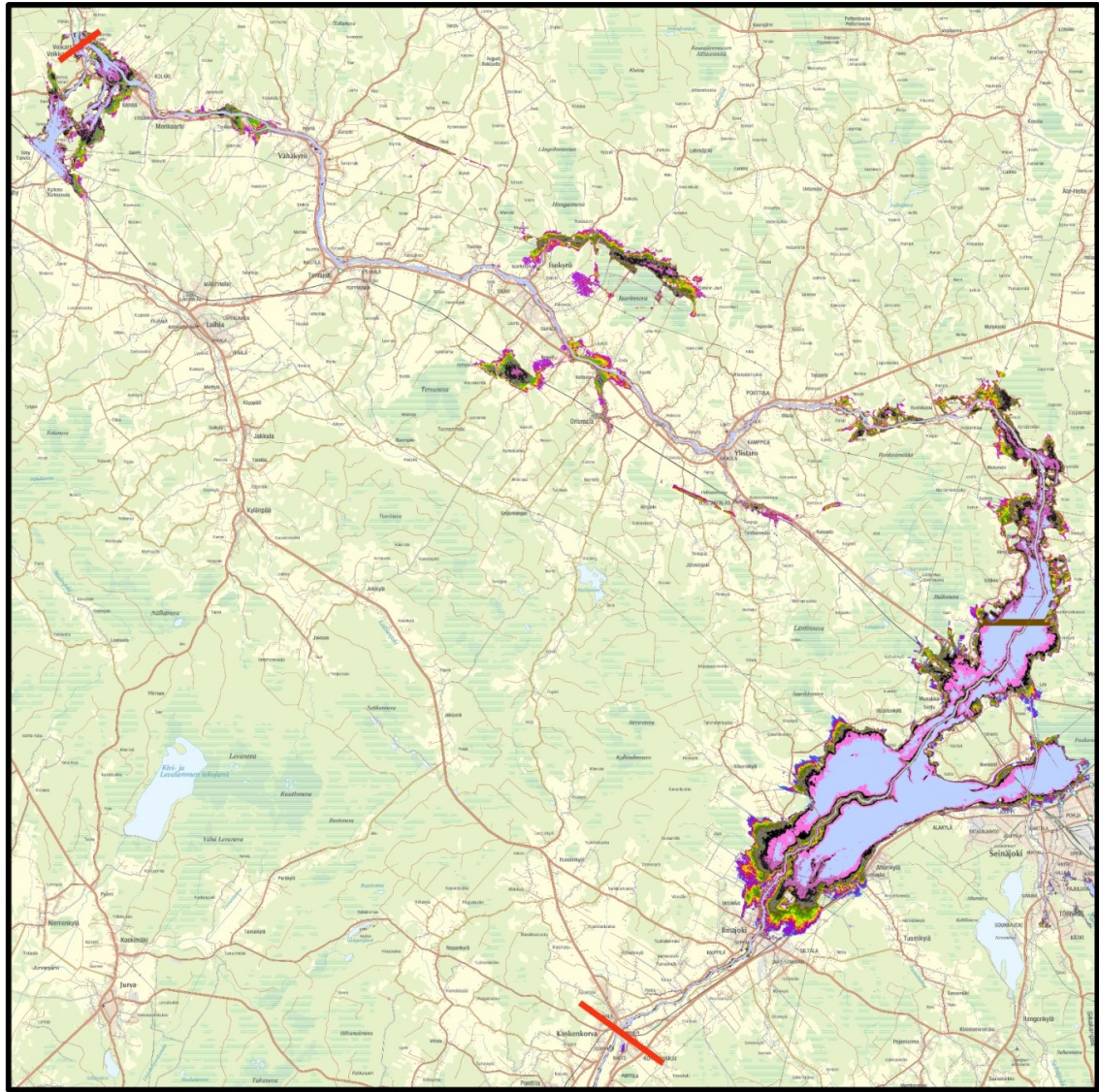
Liite 5. Uudisrakennusten nettoneliöhinnat eri rakennusluokissa ja arvioidut neliöhinnat

Taulukko 6. Uudisrakennusten nettoneliöhinnat eri rakennusluokissa (Finanssialan keskusliitto 2012) ja arvioidut neliöhinnat (*kursiivilla*). Vapaa-ajan asuntojen, saunojen ja monitoimi- ja urheiluhallien neliöhinta on brutto- ja nettoneliöhintojen keskiarvo.

Uudisrakennuksen tyyppi	Uudisrakennuksen nettoneliöhinta [€]
Omakotitalo	1360
Rivitalo	1380
Sauna	1595
Vapaa-ajan asunto	1195
Kulkuneuvojen suoja- ja huoltorakennukset	870
Muut liikenteen rakennukset	300
Piha- ja varastorakennukset, talousrakennukset	300
Maa-, metsä- ja kalatalousrakennukset	400
Navetat, sikalat ja kanalat	600
Eläinsuojat, ravihevostallit yms.	700
Päiväkodit	1900
Koulut	1750
Monitoimihallit ja muut urheiluhallit	1480
Muut kokoontumisrakennukset	1200
Seura- ja kerhorakennukset	1200
Museot	1200

Liite 6. Asutusalueen tulvavahinkojen kustannusfunktion korkeusjako ja tarkastelualueen rajausta. Eri värit kuvaavat eri vedenkorkeuksia. Kartassa myös tulvapengerrysalueet ovat värjättyneet, vaikka niillä sijaitsevia rakennuksia ei ole laskettu kustannusfunktioon mukaan. Punaiset viivat kartan pohjois- ja eteläpäissä esittävät rakennusvahinkojen tarkastelualueen rajausta.

1:250 000



0 4 000 8 000 16 000 24 000 Metriä

Pohjakartta: © Karttakeskus Oy, Lupa L4659

Liite 7. Optimointilaskelmien Matlab-koodit.

```
% Kyrönjoen yläosan tulvapengerrysalueiden käytön optimointi.
% Rajoiteyhtälöt:

% Rajoiteyhtälöt sisältävät rajoitteen, joka määrää, että Rintalan ja
Tieksin tulvaluukkujen virtaamien on oltava yhtä suuret.
Aeq = [1 1 1 1;...
       0 0 1 -1];

% Ensimmäinen arvo on joesta jaettava ylimääräinen tulvavirtaama.
beq = [40; 0];

% Virtaamien alarajat. (joki, Halkosaari, Rintala, Tieksi)
lb = [0;0;0;0];

% Virtaamien ylärajat.
ub = [28; 10; 30; 30];

% Iteroinnin alkuarvaukset.
x0 = [10; 10; 10; 10] ;

% Etsii rajoitetun optimointiongelman minimikohdan.
options = optimset('Display', 'iter');

[x, fval, exitflag] =
fmincon(@myfun,x0,[],[],Aeq,beq,lb,ub,[],options)
```

```

function f = myfun(x)

% Asuinalueen kustannusfunktio:
% Ratkaistaan vedenpinnan korkeus virtaamasta x(1)

QNikkola = [-67.0462, -30.0462, -1.4462, 26.0538, 41.8538, 53.0538,
61.6538, 68.6538, 79.6538, 88.3538, 123.3538, 176.4538];
EAsuin = [0, 0, 1222, 40971, 86092.3, 163220, 265533, 370332, 524969,
709676, 1167296, 1766160];

% Sovitetaan kuutiollisten splinien interpolaatiolla käyrä virtaama-
ja kustannusdataan.
xxta = 0:1:176;
yyta = spline(QNikkola,EAsuin,xxta);
plot(QNikkola,EAsuin,'o',xxta,yyta);

pptaajama = spline(QNikkola,EAsuin);
vAsuin = fnval(pptaajama,x(1));

% Pengerrysalueiden kustannusfunktiot:
% Halkosaari:

QHalko = [0, 0.518, 0.777, 1.209, 1.684, 2.176, 2.677, 3.182, 3.691,
4.202, 4.714, 5.228, 5.742, 6.257, 6.772, 7.288, 7.804, 8.320, 8.836,
9.353, 9.869, 10.386];

EHalko = [0, 21420, 35090, 54700, 73680, 92290, 110250, 127240,
143000, 157350, 170200, 181700, 192040, 201410, 210000, 218030,
225680, 233160, 240650, 248180, 255750, 263330];

E50Halko = 0.5*EHalko; % Sadosta 50 % korjaamatta.

xxh = 0:0.1:11;
yyh = spline(QHalko,EHalko,xxh);
plot(QHalko,EHalko,'o',xxh,yyh);

pphalko = spline(QHalko,EHalko);
pp50halko = spline(QHalko,E50Halko);

vHalko = fnval(pphalko,x(2));
v50Halko = fnval(pp50halko,x(2));

% Rintala:

QRintala = [0, 2.0, 3.1, 4.1, 5.1, 6.1, 7.1, 8.2, 9.2, 10.2, 11.2,
12.2, 13.3, 14.3, 15.3, 16.3, 17.3, 18.4, 19.4, 20.4, 21.4, 22.4,
23.5, 24.5, 25.5, 26.5, 27.5, 28.6, 29.6, 30.6, 31.6, 32.6, 33.6,
34.7, 35.7, 36.7, 37.7, 38.7, 39.8, 40.8, 41.8];

ERintala = [0, 49170, 102660, 145630, 182180, 215770, 247160, 276660,
304570, 331190, 356800, 381480, 405260, 428140, 450120, 471230,
491460, 510820, 529330, 547000, 563880, 580000, 595430, 610220,
624420, 638090, 651270, 664020, 676390, 688430, 700200, 711750,
723120, 734330, 745380, 756280, 767040, 777660, 788160, 798530,
808790];

E50Rintala = 0.5*ERintala;

```

```

xxr = 0:0.1:42;
yyr = spline(QRintala,ERintala,xxr);
plot(QRintala,ERintala,'o',xxr,yyr);

pprint = spline(QRintala,ERintala);
pp50rint = spline(QRintala,E50Rintala);

vRintala = fnval(pprint,x(3));
v50Rintala = fnval(pp50rint,x(3));

% Tieksi:

QTieksi = [0, 1.481, 2.221, 2.962, 3.702, 4.443, 5.183, 5.924, 6.664,
7.405, 8.145, 8.886, 9.626, 10.366, 11.107, 11.847, 12.588, 13.328,
14.069, 14.809, 15.550, 16.290, 17.031, 17.771, 18.511, 19.252,
19.992, 20.733, 21.473, 22.214, 22.954, 23.695, 24.435, 25.176,
25.916, 26.657, 27.397, 28.137, 28.878, 29.618, 30.359];

ETieksi = [0, 63940, 94600, 124070, 152130, 178640, 203660, 227250,
249490, 270450, 290190, 308800, 326330, 342850, 358420, 373110,
386970, 400080, 412500, 424280, 435490, 446200, 456470, 466350,
475860, 485040, 493890, 502430, 510680, 518670, 526390, 533880,
541150, 548220, 555100, 561810, 568380, 574820, 581140, 587350,
593470];

E50Tieksi = 0.5*ETieksi;

xxt = 0:0.1:31;
yyt = spline(QTieksi,ETieksi,xxt);
plot(QTieksi,ETieksi,'o',xxt,yyt);

pptiek = spline(QTieksi,ETieksi);
pp50tiek = spline(QTieksi,E50Tieksi);

vTieksi = fnval(pptiek,x(4));
v50Tieksi = fnval(pp50tiek,x(4));

% Optimoinnissa minimoidaan edellä olevien funktioiden y-arvoja.
Vastauksena saadaan muuttujien EAsuin, EHalk, ERint ja ETiek
optimaaliset arvot. Muuttujat x(1), x(2), x(3) ja x(4) edustavat eri
kohteiden virtaamia.

f = vAsuin + vHalko + vRintala + vTieksi;

```